



*Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado-Doutorado*



DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO PROCESSAMENTO DAS VAGENS DE ALGARROBA (*Prosopis juliflora*)

por

Jéssica Felipe do Nascimento

*Tese de doutorado apresentado à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutora.*

Jéssica Felipe do Nascimento

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS
BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO
PROCESSAMENTO DAS VAGENS DE
ALGARROBA (*Prosopis juliflora*)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na área de Processos de Fabricação, da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutora.

Orientadora: Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244d Nascimento, Jéssica Felipe do.

Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir do processamento das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*) / Jéssica Felipe do Nascimento. - João Pessoa, 2024.
95 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Sustentabilidade. 2. Embalagens biodegradáveis. 3. Biocompósitos. 4. Fibras vegetais. 5. Algaroba (*Prosopis juliflora*). I. Silva, Kelly Cristiane Gomes da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 502(043)

DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO PROCESSAMENTO DAS VAGENS DE ALGAROBA (*Prosopis juliflora*)

por

JÉSSICA FELIPE DO NASCIMENTO

Tese aprovada em 31 de maio de 2024

Documento assinado digitalmente



KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Data: 20/08/2024 12:15:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes
Orientador – UFPB

Profa. Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcante
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente



SANDRO MARDEN TORRES
Data: 04/10/2024 16:23:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Marden Torres
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente



CHRYSTIAN GREGÓRIO MEDEIROS DE LIMA
Data: 21/08/2024 11:27:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Chrystian Gregório Medeiros de Lima
Examinador Externo – UFPB

Documento assinado digitalmente



JOELDA DANTAS
Data: 20/08/2024 16:02:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Joelda Dantas
Examinador Externo – UFPB

Documento assinado digitalmente



RENNAN PEREIRA DE GUSMAO
Data: 19/09/2024 07:51:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rennan Pereira de Gusmão
Examinador Externo – UFCG

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Maria da Penha e José Alves que
com muito carinho e sabedoria me
ensinaram que estudar era o
melhor caminho para transformar
meus sonhos em realidade.*

AGRADECIMENTOS

Á Deus pelo seu amor infinito, cuidado e proteção em todos os dias da minha vida.

Á virgem maria, minha mãezinha do céu por interceder a Deus pela minha saúde e para que eu conseguisse finalizar esta tese. Ao meu anjo da guarda por sua proteção.

Aos meus pais, vocês são minha inspiração diária e minha razão para lutar pelos meus sonhos. Obrigada por me ensinarem valores como honestidade, respeito e gratidão.

Á professora Kelly Gomes pela orientação e por ter acreditado nas minhas capacidades. A senhora é exemplo profissional e de ser humano em minha vida.

Á Kerolayne Santos Leite pela amizade, companheirismo, parceria e por ter segurado em minha mão me dando força, em todas as vezes que pensei em desistir e que não seria capaz. Agradeço também a toda sua família pelo acolhimento e carinho.

Á minha família pelo incentivo e por torcerem pela minha conquista profissional.

Aos meus avós in memória pelo exemplo de caráter e honestidade.

Á minha amiga Izanilde Barbosa pela amizade, irmandade e carinho desde da época de mestrado, você foi um presente de Deus e quero você pra sempre em minha vida. Agradeço também a seu esposo Joseilson Santos que se tornou um amigo de grande valia me incentivando a realizar o término do meu doutorado.

Aos meus amigos Gabriela Galvão, Gorete Costa, Habila Yusurf pelo apoio e incentivo durante o decorrer deste doutorado.

Aos funcionários Lia, Eliane e Thiago do CEAR e a Monica do PPGEM pelo carinho e por tornar essa jornada mais leve, nunca vou esquecer do sorriso que sempre me recebiam nas dependências da UFPB.

Ao Laboratório de Filmes Finos (LabFilm) que disponibilizou suas dependências para execução desta pesquisa e ao técnico Fábio pelo auxílio durante a realização de várias análises.

Á banca de professores por terem aceitado o convite para avaliar e contribuir com esta pesquisa desde do período de qualificação.

Á Capes pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

Á todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, fica registrado aqui, o meu muito obrigada!

NASCIMENTO, J.F. **Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir do processamento das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*)**. João Pessoa-PB, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, maio de 2024. 95f Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Orientadora: Prof. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva.

RESUMO

Os polímeros sintéticos são amplamente utilizados na produção de embalagens, no entanto, esses materiais levam centenas de anos para se decompor e geram impactos ambientais. Os materiais biodegradáveis são uma alternativa aos polímeros sintéticos por serem facilmente degradados, entre eles a algaroba tem recebido atenção especial por ser uma fonte vegetal abundante e rica em fibras. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver embalagens rígidas biodegradáveis a partir das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*), como potenciais substitutos das embalagens comerciais do setor agroindustrial. Para tanto, foram obtidas farinhas de vagens (FV) e de fibra (FB) de algaroba que foram utilizadas como material de reforço na produção de embalagem para muda de plantas e embalagem para ovos, respectivamente. As propriedades dos materiais produzidos foram avaliadas através de análise granulométrica, rendimento, Difração de Raios X (DRX), Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectrofotometria de Ultravioleta-Visível (UV-Vis), Resistência mecânica, Ângulo de Contato (AC), Capacidade de absorção de água, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e biodegradabilidade. Com o beneficiamento da vagem foi possível obter rendimentos diferentes para FV e FB que apresentaram granulometria similar. A embalagem de mudas obteve comportamento semicristalino, pela presença de compostos lignocelulósicos e a adição do fertilizante NPK não influenciou as interações químicas entre a solução adesiva e a FV. Com o aumento da concentração de FV nos recipientes as propriedades de absorção da luz ultravioleta foram intensificadas, porém resultaram em embalagens com menor resistência a tração, e maior absorção de água. Na produção de embalagem para acondicionamento de ovos, verificou-se que o aumento no teor de glicerina não contribuiu com a formação de novas fases cristalinas e também não modificou os grupos funcionais das amostras, porém contribuiu para obtenção de uma maior resistência mecânica demonstrando que foi eficiente a interação dos constituintes da embalagem. No teste de biodegradabilidade as embalagens produzidas se degradaram significativamente alterando sua estrutura e forma inicial, ao contrário das embalagens comerciais. Os resultados obtidos validam o potencial das farinhas de algaroba para produção de biocompósitos, permitindo sugerir ao mercado, uma nova opção de matéria-prima renovável.

Palavras-chaves: Sustentabilidade, Embalagens biodegradáveis, Biocompósitos, Fibras vegetais, Algaroba.

NASCIMENTO, J.F. **Development of biodegradable packaging from mesquite pods (*Prosopis juliflora*)**. João Pessoa-PB, Technology Center, Federal University of Paraíba, May 2024. 95f. Thesis. Postgraduate Program in Mechanical Engineering. Advisor: Prof. Dr. Kelly Cristiane Gomes da Silva.

ABSTRACT

Synthetic polymers are widely used in the production of packaging, however, packaging made from this material takes hundreds of years to decompose and generates environmental impacts. Biodegradable materials are an alternative to synthetic polymers as they are easily degraded. Among biodegradable materials, mesquite has received special attention as it is an abundant plant source rich in fiber. In this context, the present work aimed to develop rigid biodegradable packaging from mesquite pods (*Prosopis juliflora*), to act as potential substitutes for commercial packaging in the agro-industrial sector. To this end, mesquite pod flour (FV) and fiber (FB) were obtained and used as reinforcing material in the production of packaging for plant seedlings and packaging for eggs, respectively. The properties of the materials produced were evaluated through granulometric analysis, yield, X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis), Mechanical resistance, Contact Angle (AC), water absorption capacity, Scanning Electron Microscopy (SEM) and biodegradability. With the processing of the pod, it was possible to obtain different yields for FV and FB, which presented similar particle size. The packaging of seedlings obtained semi-crystalline behavior, due to the presence of lignocellulosic compounds and the addition of NPK fertilizer did not influence the chemical interactions between the adhesive solution and FV. With the increase in the concentration of FV in the containers, the absorption properties of ultraviolet light were intensified, but resulted in packaging with lower tensile strength and greater water absorption. In the production of packaging for packaging eggs, it was found that the increase in glycerin content did not contribute to the formation of new crystalline phases and also did not modify the functional groups of the samples, but contributed to obtaining greater mechanical resistance, demonstrating that it was efficient interaction of packaging constituents. In the biodegradability test, the packaging produced significantly degraded, changing its structure and initial shape, unlike commercial packaging. The results obtained validate the potential of mesquite flour for the production of biocomposites, allowing us to suggest a new renewable raw material option to the market.

Keywords: Sustainability, Biodegradable packaging, Biocomposites, Vegetable fibers, Mesquite.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 ESTRUTURA DA TESE	15
CAPÍTULO II.....	16
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2. EMBALAGEM: IMPORTÂNCIA E FUNCIONALIDADE	16
2.1 EMBALAGENS PLÁSTICAS	17
2.2 EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS	19
2.2.1 USO DE FIBRAS VEGETAIS COMO MATERIAL DE REFORÇO EM EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS	21
2.2.1.1 <i>PROSOPIS JULIFLORA</i> (SW.) DC.	23
CAPÍTULO III	23
METODOLOGIA GERAL	25
CAPÍTULO IV	27
CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE BANDEJAS E RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS	27
4.1 INTRODUÇÃO	27
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.2.1 OBTENÇÃO DOS FRUTOS DE ALGAROBA.....	28
4.2.1.1 <i>BENEFICIAMENTO DAS VAGENS DE ALGAROBA PARA OBTENÇÃO DE FARINHAS DE VAGEM (FV) E DE FIBRA (FB)</i>	28
4.2.1.2 <i>CARACTERIZAÇÃO DAS FARINHAS DE VAGEM (FV) E DE FIBRA (FB)</i>	29
4.3 RESULTADOS	30
4.3.1 RENDIMENTO DAS FARINHA DE VAGEM (FV) E DE FIBRA (FB).....	30
4.3.1.1 <i>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</i>	31
4.3.1.2 <i>DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)</i>	33
4.3.1.3 <i>ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)</i>	34
4.3.1.4 <i>ESPECTROFOTOMETRIA NA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA E VISÍVEL (UV-VIS)</i>	35
4.4 CONCLUSÕES	36
CAPÍTULO V	37
RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS ELABORADOS A PARTIR DAS VAGENS DE ALGAROBA (<i>PROSOPIS JULIFLORA</i>) (SW.) DC. PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PLANTAS.	37
5. INTRODUÇÃO	37
5.1 MATERIAL E MÉTODOS	38

5.1.1 OBTENÇÃO DA FARINHA DAS VAGENS DE ALGAROBA	38
5.1.2 PRODUÇÃO DOS RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS PARA MUDAS	39
5.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS.....	40
5.2 RESULTADOS	42
5.2.1 ASPECTO VISUAL E TÁTIL DOS RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS PRODUZIDOS	42
5.2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	44
5.2.3 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	46
5.2.4 ESPECTROFOTOMETRIA NA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA E VISÍVEL (UV-Vis).....	47
5.2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS	49
5.2.6 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO	50
5.2.7 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (CAA)	52
5.2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	54
5.3 CONCLUSÕES	59
CAPÍTULO VI	60
PRODUÇÃO DE BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADAS COM FIBRAS DE ALGAROBA (<i>PROSOPIS JULIFLORA</i>)	60
6. INTRODUÇÃO	60
6.1 MATERIAL E MÉTODOS	61
6.1.1 PROCESSAMENTO DAS VAGENS DE ALGAROBA PARA OBTENÇÃO DE FARINHA DE FIBRA	61
6.1.1 PRODUÇÃO DAS BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS	61
6.1.2 CARACTERIZAÇÕES INICIAIS DAS BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS PRODUZIDAS.....	64
6.2 RESULTADOS	65
6.2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	65
6.2.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	67
6.2.3 ESPECTROFOTOMETRIA NA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA E VISÍVEL (UV-Vis).....	68
6.2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	69
6.2.5 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO	70
6.2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	74
6.3 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração Ciclo de vida de um material plástico.	18
Figura 2. Classificação de polímeros biodegradáveis de acordo com sua fonte de obtenção.	19
Figura 3. Ilustração da estrutura química do amido: amilose e amilopectina.	20
Figura 4. Ilustração da estrutura química do amido: amilose e amilopectina.	22
Figura 5. Captura fotográfica dos componentes do fruto de <i>Prosopis juliflora</i> : (a) vagens, (b) cápsulas, (c) sementes.....	24
Figura 6. Fluxograma das etapas experimentais.....	26
Figura 7. Fluxograma para obtenção de farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB).....	29
Figura 8. Curva de distribuição granulométrica da farinha de vagem (FV) de algaroba.	31
Figura 9. Curva de distribuição granulométrica da farinha de fibra (FB) de algaroba.....	32
Figura 10. Difrátogramas das farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB) de <i>Prosopis juliflora</i>	33
Figura 11. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier das farinhas de vagem (FV) e fibra (FB) de <i>Prosopis juliflora</i>	34
Figura 12. Espectros de UV-Vis das farinhas de vagem (FV) e fibra (FB) de <i>Prosopis juliflora</i> . .	35
Figura 13. Fluxograma para dos recipientes biodegradáveis.	40
Figura 14. Imagens capturadas dos recipientes biodegradáveis produzidos para mudas de plantas.	42
Figura 15. Difrátogramas dos recipientes biodegradáveis fabricados.	45
Figura 16. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier dos recipientes fabricados. .	46
Figura 17. Espectros de UV-Vis dos recipientes biodegradáveis fabricados.	48
Figura 18. Imagens da determinação do ângulo de contato dos recipientes biodegradáveis produzidos.....	51
Figura 19. Capacidade de absorção de água (CAA) dos recipientes biodegradáveis produzidos. .	53
Figura 20. Micrografias dos recipientes biodegradáveis produzidos (100x).....	55
Figura 21. Imagens dos corpos de prova submetidos ao teste de biodegradabilidade.	57
Figura 22. Análise de perda de massa dos recipientes produzidos.....	58
Figura 23. Fluxograma ilustrativo do processo de desenvolvimento das bandejas biodegradáveis fabricadas.	63
Figura 24. Difrátogramas das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.	66
Figura 25. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.....	67
Figura 26. Espectros de UV-Vis das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.	68
Figura 27. Imagens capturadas da determinação do ângulo de contato das bandejas de ovos fabricadas.	71
Figura 28. Capacidade de absorção de água (CAA) das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.	73
Figura 29. Micrografias das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas (100x).	75
Figura 30. Imagens das bandejas biodegradáveis de ovos submetidas ao teste de biodegradabilidade.	77
Figura 31. Análise de perda de massa dos recipientes produzidos.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das formulações para produção dos recipientes biodegradáveis.	40
Tabela 2 - Tensão de Ruptura (MPa) e Alongamento (%) dos recipientes biodegradáveis.	49
Tabela 3 - Valores de Ângulo de Contato (AC) dos recipientes biodegradáveis produzidos. .	51
Tabela 4 - Composição das formulações para o desenvolvimento de bandejas biodegradáveis.	62
Tabela 5 - Tensão de Ruptura (MPa) e Alongamento (%) das bandejas de ovos biodegradáveis.	69
Tabela 6 - Valores de Ângulo de Contato (AC) das bandejas de ovos biodegradáveis produzidas.	71

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Em todo mundo, atualmente existe uma busca incansável por soluções sustentáveis que sejam coerentes para os problemas provenientes da geração excessiva de resíduos sólidos, ocasionado pelo crescimento econômico, urbanização e industrialização. O aumento no volume de resíduos é um sério problema ambiental, fazendo com que governos nacionais e locais, e empresas busquem alternativas sustentáveis que possibilitem a resolução desta problemática (JUNIOR; OLIVEIRA; TAQUARITINGA, 2019; KIBRIA *et al.*, 2023,).

Neste cenário a indústria de embalagens plásticas é apontada como uma das principais geradoras de resíduos, de modo que vem sendo pressionada a pesquisar e desenvolver materiais ecologicamente corretos que possibilitem redução dos impactos ambientais e a substituição de embalagens produzidas por polímeros de origem petrolífera (DAHLBO *et al.*, 2018; KHOAELE *et al.*, 2023). A utilização de materiais não biodegradáveis e não renováveis na produção de embalagens comerciais tem despertado preocupação devido a grande quantidade de resíduos plásticos que são produzidos todos os anos e não se tem um gerenciamento seguro de tais resíduos (REIS *et al.*, 2018; EVODE *et al.*, 2021).

Nos anos de 2020 e 2021 observa-se que ocorreu um aumento significativo no volume de lixo plástico produzido em função da pandemia do coronavírus, que acarretou alta demanda no consumo de materiais descartáveis (SILVA-GUZMÁN *et al.*, 2021). No entanto apesar dos diversos benefícios que o plástico traz para a sociedade, sua utilização provoca sérios problemas ao meio ambiente em virtude da reduzida taxa de degradação, uma vez que esse tipo de material leva muitos anos para serem decompostos por microrganismos e por fatores abióticos, impactando negativamente os ecossistemas terrestres (MEYS *et al.*, 2020).

Diante desta realidade, nas últimas décadas objetivando atender as demandas ambientais que surgiram a partir do impacto das embalagens plásticas tradicionalmente produzidas, tem se incentivado a substituição destes materiais por produtos que sejam biodegradáveis e provenientes de fontes naturais renováveis, cujo descarte e degradação na

natureza reduzam e minimizem os impactos ambientais (MLALILA *et al.*, 2018; KOSIOR *et al.*, 2020).

Neste contexto o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis representa uma alternativa promissora para substituir ou minimizar o uso de embalagens plásticas, uma vez que, quando deixadas no meio ambiente se decompõem de forma natural, a partir da ação de bactérias e fungos presentes no solo, na água e no ar (QUIN *et al.*, 2019; SHEN *et al.*, 2020). A decomposição de materiais biodegradáveis não gera subprodutos tóxicos e ocorre em curto espaço de tempo, em sua degradação são produzidos água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) e biomassa, que podem ser reintegrados a natureza e tornar-se parte do solo com possibilidade de reutilização como adubo para o plantio de novas plantas (GUNAWAN *et al.*, 2020). Sendo assim a produção de embalagens biodegradáveis a cada dia ganha mais espaço e destaque no mercado, visto que ajudam a reduzir a demanda de matérias-primas não renováveis e diminuem o volume de resíduos no meio ambiente (SUCINDA *et al.*, 2021).

Para fabricação de embalagens biodegradáveis, atualmente o amido é um dos polímeros mais estudados, devido ao baixo custo e facilidade de obtenção. Porém pesquisas realizadas por Marichelvam *et al.* (2019) mostraram que a produção de embalagens exclusivamente com amido não é viável, devido às suas características hidrofílicas, que torna os materiais quebradiços e pouco resistente a umidade. Desta forma, com a finalidade de melhorar as propriedades de resistência mecânica e de umidade destes materiais, estudos estão sendo desenvolvidos propondo a incorporação de fibras ou aditivos às formulações, para serem aplicadas como embalagens (FERNANDES *et al.*, 2020; ASSIS *et al.*, 2020; SÁNCHEZ-GUTIÉRREZ *et al.*, 2021).

Neste sentido, a *Prosopis juliflora* comumente conhecida como algarobeira é uma árvore da família leguminosa facilmente encontrada em regiões áridas e semiáridas do nordeste brasileiro, que destaca-se por sua alta produtividade de frutos (vagens), resistência a seca e elevado potencial energético, esta espécie no meio rural possui inúmeras aplicações e usos desde a antiguidade sendo considerada uma cultura de importante valor econômico e social que pode contribuir de maneira significativa para o desenvolvimento sustentável (EDRISI; KEBLAWY; ABHILASH, 2020). Entretanto, na literatura até o presente momento não são encontrados estudos científicos sobre a utilização das fibras e vagens de algaroba para produção de embalagens rígidas.

Em vista disso, foi proposto neste trabalho, desenvolver embalagens rígidas biodegradáveis a partir das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*), como potenciais substitutos das embalagens comerciais do setor agroindustrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver embalagens rígidas biodegradáveis a partir das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*), como potenciais substitutos das embalagens comerciais do setor agroindustrial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o rendimento e o potencial das vagens de algaroba serem utilizados como matéria-prima na produção de embalagens sustentáveis;
- Desenvolver recipientes biodegradáveis para produção de mudas de plantas utilizando farinha de vagem de algaroba;
- Desenvolver bandejas biodegradáveis para a comercialização, transporte e armazenamento de ovos utilizando farinha de fibras extraídas de vagens de algaroba;
- Analisar a incorporação do fertilizante NPK nas propriedades físico-químicas, mecânicas e óticas dos recipientes biodegradáveis produzidos;
- Avaliar os efeitos das diferentes concentrações de glicerina nas propriedades físico-químicas, mecânicas e óticas das embalagens de ovos produzidas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho foi dividido em 06 (seis) capítulos.

No Capítulo I é apresentada uma introdução ao tema e os objetivos da pesquisa.

Os Capítulos II e III são dedicados ao estado da arte sobre o tema e a metodologia geral adotada na pesquisa.

Nos Capítulos IV, V e VI são apresentados os artigos produzidos durante o desenvolvimento da tese.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2. EMBALAGEM: IMPORTÂNCIA E FUNCIONALIDADE

Diante do contexto atual para atender as necessidades e demandas crescentes da sociedade, as embalagens graças as suas múltiplas funções, exercem um destaque fundamental na indústria moderna, por desempenhar um importante papel na proteção, preservação, conservação e transporte de produtos. Em todos os segmentos as embalagens são utilizadas para aumentar a visibilidade do produto, comunicar-se com o consumidor, bem como para potencializar as vendas, visto isto empresas estão buscando aplicar uma abordagem inovadora e criativa no desenvolvimento de embalagens (RAMCHANDANI et al, 2021).

Na literatura autores evidenciam que o conceito de embalagem surgiu há mais de 10.000 anos atrás, provavelmente na pré-história, quando o homem sentiu a necessidade de transportar, armazenar e conservar alimentos para garantir sua sobrevivência em tempos de escassez (LOTHFY; NARAYANA; RANJANI, 2019). De acordo com Oliveira e Borges (2020) as primeiras embalagens se constituíam apenas de elementos encontrados na natureza como, folhas de árvore, conchas, cascas de coco e crânio de animais, não envolvendo ainda qualquer modificação da matéria-prima. Porém, com o passar do tempo, devido à necessidade de produzir embalagens em escala industrial, o vidro foi a primeira matéria-prima a ser modificada, seguido do metal, papelão e papel (LANDIM; BERNARDO; MARTINS, 2016).

No fim da segunda guerra mundial, para produção de embalagens surge um novo material, o plástico, seguido da descoberta do poliestireno expandido, sendo este considerado o principal material utilizado em embalagens no formato de bandejas para acondicionar produtos alimentícios (MIGUEL; TIRADO; RAUL, 2016; RAHARDIYAN *et al.*, 2023). A descoberta destes materiais revolucionou a indústria proporcionando desenvolvimento social e econômico.

Na indústria de alimentos, as embalagens são extremamente importantes, isto porque atuam como barreira contra fatores responsáveis pela deterioração química, física e microbiológica, além de acondicionar, conservar e manter a qualidade e segurança dos alimentos (WILSONN *et al.*, 2019). Para o setor agrícola as embalagens plásticas também são

destaque por serem muito utilizadas no plantio e transporte de mudas, visto que garantem um melhor desenvolvimento das raízes (PRAVEEN *et al.*, 2020).

O mercado mundial de embalagens é apontado com um negócio rentável por ser capaz de movimentar bilhões de dólares ao ano, gerar empregos e está em constante desenvolvimento (LEHNER *et al.*, 2019). No Brasil, em 2023 este setor cresceu cerca de 17,21% quando comparado ao ano de 2022, totalizando o montante de R\$ 144,4 bilhões, para os próximos cinco anos as previsões sugerem aumentos significativos nesses números, influenciados por mudanças dos hábitos de consumo que ocorreram durante a pandemia do novo coronavírus (ABRE, 2023).

Deste modo, no setor de embalagens empresas e institutos de pesquisa estão em busca de inovações tecnológicas para conferir mais segurança, comodidade e praticidade para o consumidor, bem como proteger melhor o produto e minimizar os impactos ambientais (YU *et al.*, 2018; REICHERT *et al.*, 2020). Visto que apesar de muito úteis e importantes para a economia e sociedade, as embalagens representam um dano em potencial à natureza devido a produção excessiva de resíduos, dessa forma é importante impulsionar o desenvolvimento socioeconômico sustentável.

2.1 EMBALAGENS PLÁSTICAS

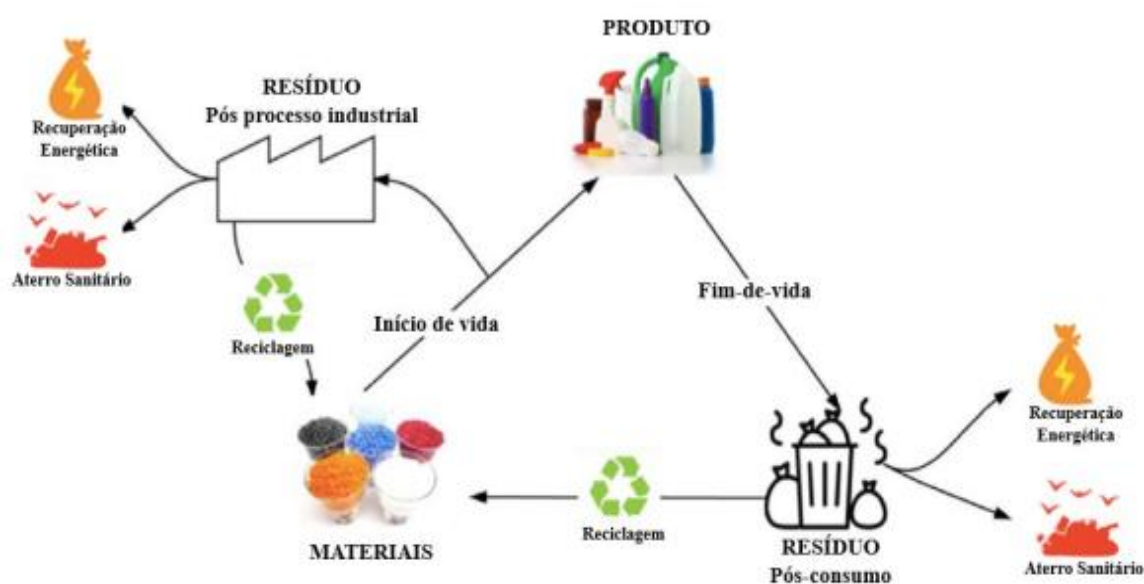
As embalagens plásticas convencionais são consideradas essenciais para diversos setores, mas em especial no setor alimentício são amplamente empregadas para proteger, transportar e prolongar a vida útil dos alimentos, sendo assim, este setor é responsável por cerca de 50% do consumo de todo material plástico produzido no mundo (JEEVAHAN; CHANDRASEKARAN, 2019). Na agricultura o uso de embalagens plásticas vem crescendo e está presente em todas as etapas do processo produtivo, em destaque na produção de mudas, recipientes plásticos são utilizados para alavancar as produções agrícolas. Neste sentido, para a produção global de embalagens, verifica-se que o material dominante é o plástico devido sua versatilidade, baixo custo e facilidade de fabricação (COLTELLI *et al.*, 2018).

Plásticos são materiais utilizados para produção de uma gama de produtos, formados por polímeros sintéticos, que apresentam a capacidade de serem moldados por extrusão, moldagem, fundição ou fiação (REICHERT *et al.*, 2020). Provenientes de fontes não renováveis, apresentam boas propriedades físicas, químicas e mecânicas, no entanto provocam sérios impactos ambientais quando descartados na natureza, em razão da grande quantidade de

resíduos produzidos (DAHLBO *et al.*, 2018). Na Figura 1 é descrito o esquema do ciclo de vida de um material plástico.

Polímeros sintéticos são macromoléculas constituídas por moléculas estruturais menores chamadas de monômeros, produzidos em laboratório geralmente derivados de petróleo (CHEN *et al.*, 2020). Para produção de embalagens os principais polímeros sintéticos utilizados são: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Politereftalato de etileno (PET) e Policloreto de vinila (PVC) (GROH *et al.*, 2019).

Figura 1. Ilustração Ciclo de vida de um material plástico.



Fonte: Adaptado de Ragaert, Delva e Geen (2017).

Para fins de aplicação é importante a correta especificação das embalagens, de forma a dimensioná-las exatamente de acordo com as necessidades de proteção do produto, considerando sua vida útil, bem como suas características do sistema de distribuição e estocagem. Deste modo, a depender da finalidade de aplicação, as embalagens plásticas podem ser classificadas como rígidas, semirrígidas e flexíveis, sendo que dentre estas se destacam as rígidas que são aquelas de formato fixo não dependentes da forma física do produto acondicionado (VAN-ENGELSHOVEN *et al.*, 2019).

O consumo de embalagens plásticas aumenta significativamente em todo mundo, fato considerado preocupante devido os impactos negativos que provocam ao meio ambiente (SILVA *et al.*, 2021). Para mitigar esses impactos, a indústria e a ciência estão em busca de

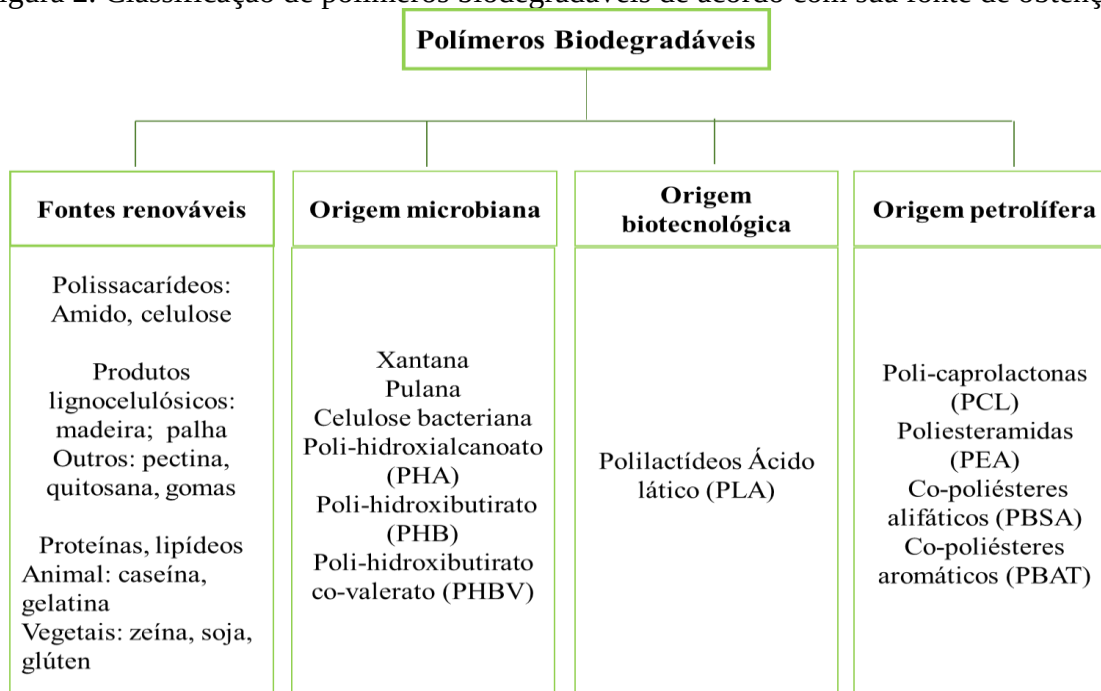
novos materiais para fabricar embalagens que sejam provenientes de fontes energéticas renováveis tais como os polímeros naturais, de forma que venham contribuir positivamente com a sustentabilidade.

2.2 EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS

Problemas de poluição ocasionados pelo acúmulo de resíduos das embalagens plásticas no meio ambiente, impõem a necessidade de uma rota alternativa para diminuir os impactos nos centros urbanos, solos, cursos d'água e oceanos (TABASUM *et al.*, 2019). Neste sentido a produção de embalagens biodegradáveis é vista como uma opção para solucionar esta problemática, além de funcionar como estratégia de *marketing* para empresas investirem, uma vez que os consumidores estão exigindo que as empresas adotem medidas que minimizem a degradação ambiental (HASAN *et al.*, 2019).

Segundo Jafarzadeh *et al.* (2020) embalagem biodegradável é definida como um material capaz de sofrer decomposição a partir do mecanismo de ação enzimática dos micro-organismos. A produção deste tipo de embalagem é realizada a partir de biopolímeros que possuem alta aplicabilidade e podem ser utilizados para substituir os polímeros sintéticos. De forma geral, os biopolímeros podem ser classificados em diferentes tipos de acordo com seus processos de síntese e fontes (SAMIR *et al.*, 2022), como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2. Classificação de polímeros biodegradáveis de acordo com sua fonte de obtenção.

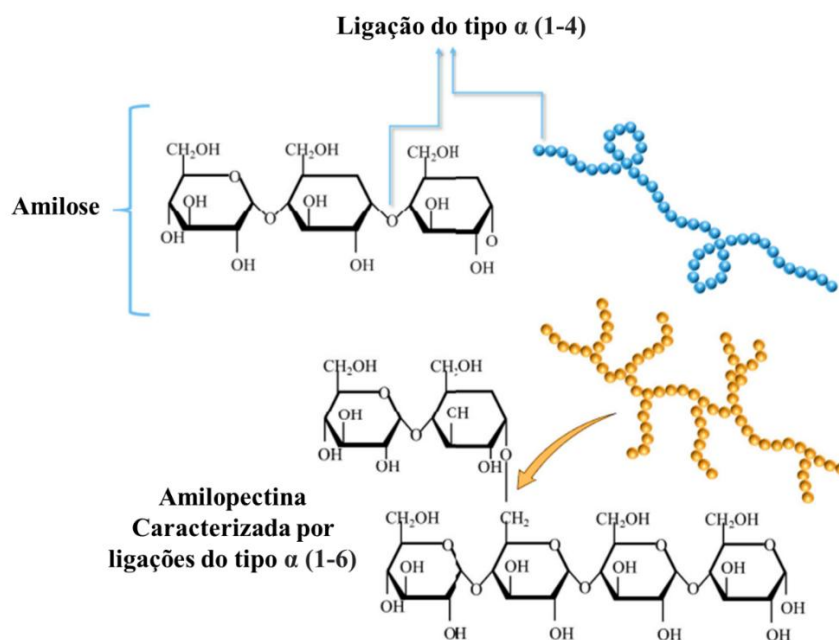


Fonte: Adaptado de Samir *et al* (2022).

Entre os biopolímeros apresentados, o amido é destaque como matéria-prima para produção de embalagens. O amido é um polissacarídeo natural biodegradável, amplamente disponível, de baixo custo, fácil obtenção e renovável (FAN; PICCHIONI, 2020). Constitui a principal fonte de energia das espécies vegetais, sendo encontrado em grandes quantidades nos tubérculos, rizomas sementes e bulbos. Pode ser extraído de diversas fontes vegetais, como milho, trigo, mandioca, arroz, batata, entre outros, através de processos relativamente simples obtendo altos índices de rendimento.

Quimicamente, o amido é composto por moléculas de açúcar (glicose) associadas entre si por ligações α (1-4) e α (1-6) que formam frações estruturais diferentes, chamadas de amilose e amilopectina (Figura 3) (BANGAR *et al.*, 2022), cujas proporções variam de acordo com a espécie botânica. De acordo com Apriyanto, Compart e Fettke (2022) a amilose é um polissacarídeo linear composto de unidades de glicose unidas por ligações do tipo α -1-4 glicosídicas, em média é responsável por 20-30% da composição do amido, já a amilopectina é um componente macromolecular ramificado, polimerizado por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) com ramificações em α -(1 $\rightarrow$ 6) e é responsável por 70-80% da composição do amido.

Figura 3. Ilustração da estrutura química do amido: amilose e amilopectina.



Fonte: Adaptado de Ferreira *et al* (2018).

Na literatura são difundidos diversos trabalhos que têm sido realizados utilizando o amido para produção de embalagens biodegradáveis (SANYANG *et al.*, 2017;

MARICHELVAM; JAWAID; ASSIM, 2019; CHI; WANG; CATCHMARK, 2020). No entanto, embora o amido seja um material biodegradável que pode ser fabricado em grandes quantidades a um custo relativamente baixo, os materiais resultantes deste polímero apresentam natureza quebradiça e hidrofílica, fato que limita sua aplicação tecnológica em embalagens (PEIGHAMBARDoust *et al.*, 2019).

Neste contexto, para aumentar a flexibilidade, bem como para melhorar a facilidade de processamento do amido, vários plastificantes (glicerol, glicol, sorbitol) são empregados com o intuito de reduzir a fragilidade das embalagens biodegradáveis (TAN *et al.*, 2022). O glicerol, conhecido popularmente como glicerina, é um composto orgânico muito utilizado em compósitos de amido para aumentar a mobilidade das cadeias poliméricas e proporcionar diminuição das zonas quebradiças (BANGAR *et al.*, 2021).

2.2.1 Uso de fibras vegetais como material de reforço em embalagens biodegradáveis

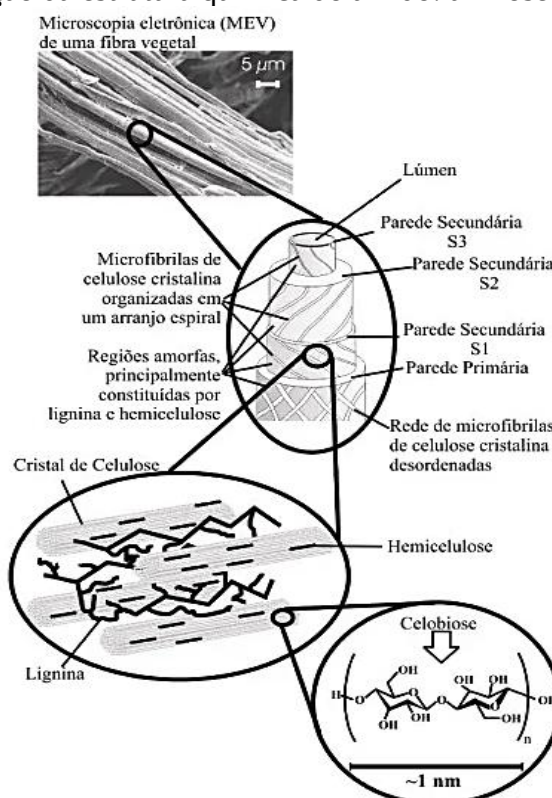
Visando a melhoria das propriedades termomecânicas de embalagens biodegradáveis, a mistura de polímeros naturais tem sido amplamente utilizada em virtude da relação custo-benefício no setor industrial. Neste âmbito, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas para avaliar a viabilidade da utilização de fibras vegetais como reforço em materiais compósitos de matriz polimérica (THANGADURAI *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2021; BANGAR *et al.*, 2023;). Deste modo, pesquisadores, cientistas e engenheiros estão desenvolvendo extensos trabalhos para tornar o uso de fibras vegetais uma matéria-prima adequada para substituir fibras sintéticas.

A adição de fibras vegetais em matriz polimérica visa melhorar suas propriedades, reduzir os custos da composição polimérica, minimizar a geração de resíduos sólidos e consequentemente reduzir os impactos ambientais (RAMESH *et al.*, 2021). Na literatura são encontrados relatos que a utilização das fibras de cana-de-açúcar e coco, como reforço em comparação às cargas inorgânicas apresentam vantagens, tais como obtenção de materiais de baixa densidade, menor abrasão durante processamento, obtenção de altos níveis de preenchimento que resultam em aumento na resistência mecânica e aumento na durabilidade (TANWAR *et al.*, 2021; GAFUR *et al.*, 2023; FITCH *et al.*, 2023). Além destas vantagens, as fibras vegetais são atóxicas, biodegradáveis, oriundas de fontes renováveis de grande disponibilidade e de baixo custo.

As fibras vegetais abundantemente são encontradas na flora mundial, podendo estar presentes em várias partes das plantas como, raiz, caule, folha, semente e fruto. Independentemente da fonte as fibras naturais possuem em sua composição cinco componentes básicos, a saber, celulose, hemicelulose, lignina, pectina e extrativos (gorduras, proteínas e sais inorgânicos) (VELUSAMY *et al.*, 2019).

Como componentes principais destaca-se a celulose que é responsável pela resistência da fibra, devido ao seu alto grau de polimerização e orientação molecular, que se caracteriza por ser um polímero linear cristalino formado por unidades β -D-glicopironases unidas por ligações glicosídicas, contudo a hemicelulose, é uma variedade de moléculas complexas, amorfas e de unidades β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose e ácido β -D-glicurônico (OMRAN *et al.*, 2021). A lignina é uma macromolécula formada por um sistema aromático, reticulado, com elevada massa molar, amorfo e com unidades de fenilpropano (ILYAS *et al.*, 2020). Na Figura 4 é apresentada a organização estrutural de uma fibra vegetal.

Figura 4. Ilustração da estrutura química do amido: amilose e amilopectina.



Fonte: Silva *et al.* (2018).

A incorporação de fibras vegetais em matrizes termoplásticas resulta na formação de compósitos, que são definidos como materiais compostos por dois ou mais componentes,

constituídos de uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço) (NURAZZI *et al.*, 2021). Compósitos poliméricos constituídos de fases de origem natural são denominados de biocompósitos, por serem ecologicamente corretos, totalmente degradáveis e sustentáveis, ou seja, no final do seu ciclo de vida, eles podem ser facilmente descartados ou compostados sem agredir o meio ambiente (ASYRAF *et al.*, 2020).

Sabendo-se que o Brasil possui uma ampla disponibilidade de recursos naturais renováveis que podem ser utilizados como matéria-prima, tem-se um cenário adequado para avançar nos estudos referentes ao desenvolvimento de biocompósitos para atender ao setor de embalagens. Neste seguimento a utilização de vagens de algaroba ainda é pouco estudada para esta finalidade, porém, sua aplicação pode contribuir para minimizar os problemas ambientais, agregar valor ao produto e reduzir os custos de processamento.

2.2.1.1 *Prosopis Juliflora* (SW.) DC.

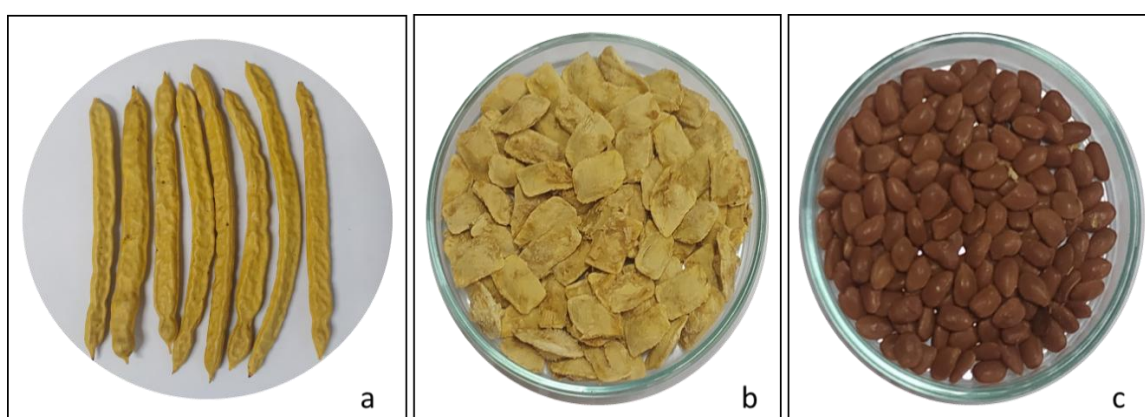
Árvore perene de grande porte, nativa do norte da América do Sul, popularmente conhecida como Algaroba ou Algarobeira (*Prosopis juliflora*), é uma leguminosa, que cientificamente pertence à família *Fabaceae*, subfamília *Mimosoideae*, do gênero *Prosopis*, sendo que atualmente cerca de 44 espécies deste gênero foram identificadas (HUSSAIN *et al.*, 2020).

No nordeste brasileiro essa xerófita foi implantada na década de 40 através sementes oriundas do Peru, com o objetivo de alimentar animais e reflorestar as terras áridas e secas desta região (MUDGIL; BARAK, 2020). Na agricultura a algarobeira desperta a atenção dos agricultores, bem como dos órgãos de fomento devido sua capacidade de resistir a prolongados períodos de seca e por ser uma das raras espécies capazes de possibilitar aos animais e ao homem, subsídios necessários para driblar as condições adversas de temperatura, escassez hídrica e solo (DAMASCENO *et al.*, 2017).

Segundo Patnaik, Abbasi e Abbasi (2017) a *Prosopis juliflora* pode atingir até 20 m de altura, apresenta raiz pivotante ou axial, caule com espinhos, folhas compostas bipinadas, inflorescências em espigas axilares e frutos em forma de vagens achatadas que contém em seu interior sementes protegidas por capsulas fibrosas (Figura 5a, b c). As vagens desta espécie são ricas em nutrientes, como carboidratos e proteínas com valor energético bruto comparável ao milho, além disso, apresentam alta digestibilidade e boa palatabilidade

Nos estudos desenvolvidos por Guilherme e colaboradores (2012) a polpa da vagem que corresponde a 56% do fruto, foram encontrados 1,6% de fibra solúvel e 31% de fibra insolúvel, também foi observado minerais e carboidratos com a predominância de sacarose que pode chegar até 40% da sua composição. De acordo com Salama *et al* (2018), a composição química e o valor energético das vagens podem sofrer alterações devido a fatores como, o lugar onde foi produzida e o tipo de processamento ao qual foi submetida.

Figura 5. Captura fotográfica dos componentes do fruto de *Prosopis juliflora*: (a) vagens, (b) cápsulas, (c) sementes.



Fonte: Autoria própria.

A utilização da biomassa desta espécie em regiões áridas e semiáridas vem ganhando força como linha de estratégia do fortalecimento da economia nas unidades agropecuárias pequenas e médias, representando uma alternativa para tornar as propriedades mais resistentes aos efeitos negativos da estiagem, bem como para proporcionar a população benefícios sociais, como empregos e melhoria da qualidade de vida nas áreas rurais (MUDGIL; BARAK, 2020) . Neste sentido, realizar pesquisas sobre o aproveitamento integral da biomassa de algaroba é interessante para a ciência, visto que, com o passar dos anos, estudos sobre as potencialidades desta cultura estão escassos.

Assim, mediante revisão na literatura foi possível observar que a utilização dos frutos da *Prosopis juliflora*, tem sido pouco explorada como material alternativo e sustentável para desenvolver novos bioprodutos. Desta forma, este estudo visa mostrar viabilidade da utilização de biomassa de algaroba como recurso renovável para desenvolver embalagens biodegradáveis.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA GERAL

3. ETAPAS METODOLÓGICAS

Visando atender os objetivos da presente pesquisa, foram realizadas as etapas descritas abaixo.

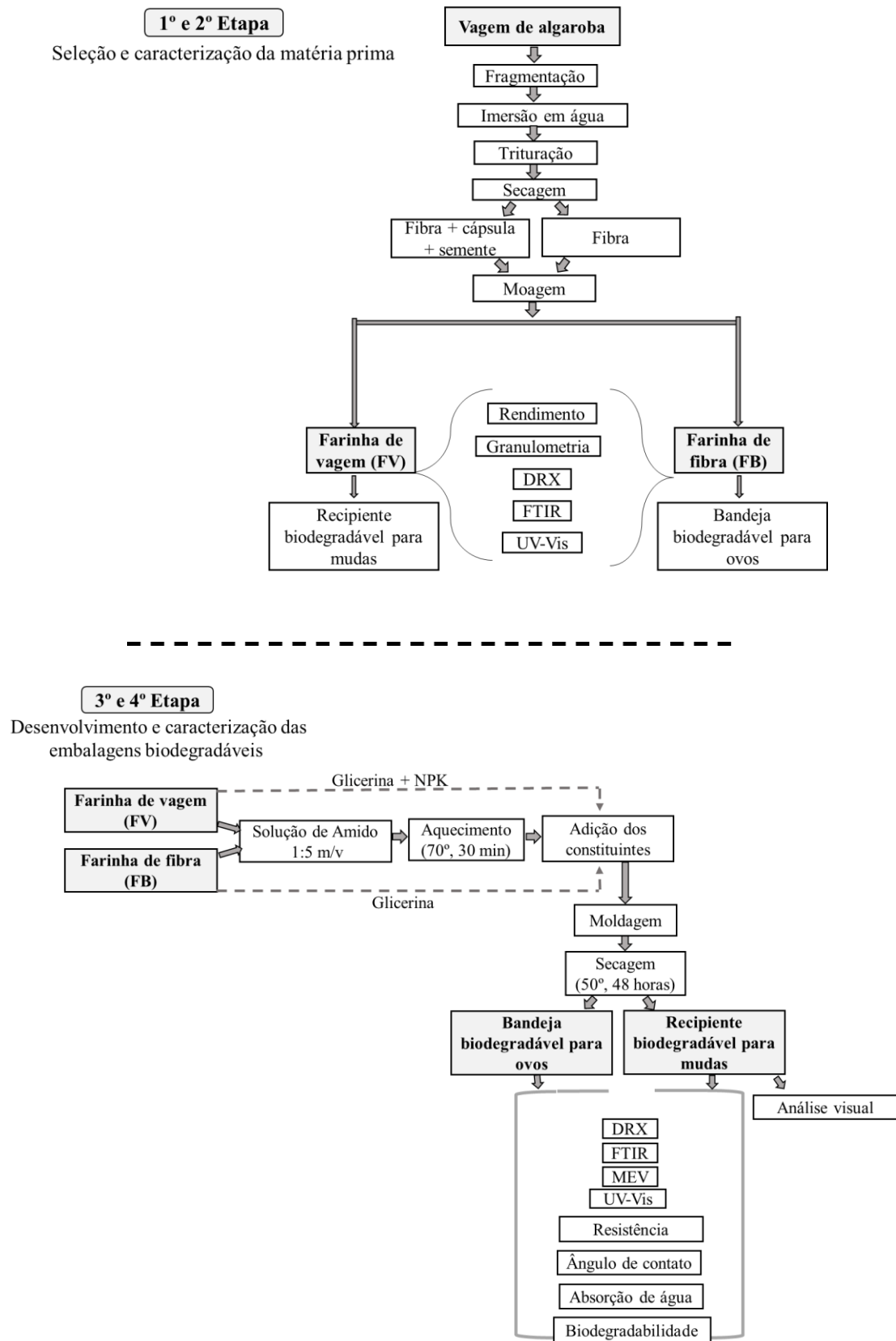
- 1) Seleção das matérias-primas;
- 2) Caracterização das matérias-primas;
- 3) Desenvolvimento das embalagens;
- 4) Caracterização das embalagens obtidas.

Para uma melhor compreensão das etapas descritas, na Figura 6 estão esquematizadas todas as etapas experimentais. Como foram desenvolvidos diferentes produtos, optou-se por apresentar cada metodologia e os seus processos específicos de obtenção nos capítulos **IV, V e VI**.

Neste trabalho, foi realizada a caracterização das matérias-primas em relação ao rendimento e granulometria, além das análises de difração de raios x (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e Espectroscopia na região do Ultravioleta e Visível (UV-VIS). Após estas análises, as matérias-primas foram aplicadas na produção das embalagens biodegradáveis (recipiente para muda de planta e bandeja de ovo) que foram caracterizadas em relação a absorção de água, UV-VIS, FTIR, DRX, resistência mecânica e ângulo de contato, como já descrito no escopo deste trabalho.

Para melhor avaliação da viabilidade de utilização da FV e FB, na produção dessas embalagens foram realizadas as seguintes análises: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e teste de biodegradabilidade.

Figura 6. Fluxograma das etapas experimentais.



Fonte: Autoria própria, 2024

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE BANDEJAS E RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS

4.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o interesse em reduzir os custos de produção, aliado a necessidade de minimização dos impactos ambientais, têm incentivado a indústria de compósitos a utilizar biomassa vegetal na confecção de produtos (BRITO *et al.*, 2019; GONG *et al.*, 2024). Neste sentido, a comunidade científica com o objetivo de desenvolver novos materiais ambientalmente sustentáveis, está intensificando estudos de caracterização de fontes vegetais com potencial para substituir os materiais sintéticos tradicionalmente utilizados no mercado (GALLO *et al.*, 2022). De acordo com Nižetić *et al.* (2019) promover o uso inteligente dos recursos e a eliminação de resíduos são um dos desafios da atualidade, bem como uma das exigências da sustentabilidade.

Diante deste cenário o uso de fibras vegetais como material de reforço em compósitos poliméricos para produção de embalagens vem ganhando destaque devido ao seu baixo custo, baixa densidade, baixo impacto ambiental, baixo consumo de energia, biodegradabilidade, além de alta disponibilidade essenciais para viabilizar seu uso em escala industrial (PATIL *et al.*, 2018; BHARDWAJ *et al.*, 2020). Desta maneira a utilização de matéria-prima obtida a partir de fontes renováveis representa uma nova abordagem no desenvolvimento de materiais, sendo atualmente considerada uma alternativa viável em virtude do crescente interesse por produtos ecologicamente corretos (PAULA; TRIANOSKIB; AZEVEDO, 2020).

Frente a esta realidade, o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis derivadas de recursos naturais tem recebido atenção especial e avanços tecnológicos significativos estão sendo alcançados tornando este produto econômico e capaz de cumprir as funções necessárias durante sua vida útil (BHARGAVA *et al.*, 2020). Na produção de embalagens biodegradáveis o amido é muito utilizado como matéria-prima, no entanto, a incorporação de materiais de reforço, como as fibras e os resíduos lignocelulósicos, são estudados para melhorar as propriedades das embalagens à base de amido (COLLAZO-BIGLIARDI *et al.*, 2019).

Na literatura vários autores desenvolveram estudos referentes ao desenvolvimento de embalagens biodegradáveis utilizando amido com adição de diferentes tipos de fibras advindas da natureza, tais como bagaço de cana-de-açúcar (DEBIAGI; MARJORIE MARIM; MALI, 2014; CRUZTIRADO *et al.*, 2017; GUPTA *et al.*, 2020; MAHMUD; BELAL e GAFURC *et al.*, 2023; FITCH *et al.*, 2023), malte (FERREIRA; MOLINA; PELISSARI, 2020) e casca de coco (KOCAMAN *et al.*, 2017; TANWAR *et al.*, 2021).

No mundo a utilização de fibra vegetal proporciona novas perspectivas de mercado, graças a ampla diversidade e disponibilidade (SARSAIYA *et al.*, 2019). Entretanto, várias espécies vegetais no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis ainda não são exploradas, o que acarreta prejuízos sociais, econômicos e tecnológicos. Dentre estas espécies se destaca a *Prosopis juliflora* conhecida popularmente como algaroba ou algarobeira, planta rústica da família leguminosae, amplamente cultivada nas regiões áridas e semiáridas do nordeste brasileiro, em razão de sua alta resistência a seca, a temperaturas elevadas e a solos pobres, que mesmo nestas condições produzem alta quantidade de frutos (MUDGIL; BARAK, 2020).

Portanto, visando o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis de forma eficaz, através da economia circular, do desenvolvimento sustentável e da inovação, o objetivo do presente estudo foi caracterizar vagens de algaroba para serem utilizadas como material de reforço em embalagens rígidas biodegradáveis.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 OBTENÇÃO DOS FRUTOS DE ALGAROBA

As vagens de algaroba foram coletadas na cidade de Batalha, no Estado de Alagoas, armazenadas em sacos plásticos a temperatura ambiente, vedadas e encaminhadas para o Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes finos (LabFilm/CEAR) da Universidade Federal da Paraíba, onde foi realizado o processo de beneficiamento.

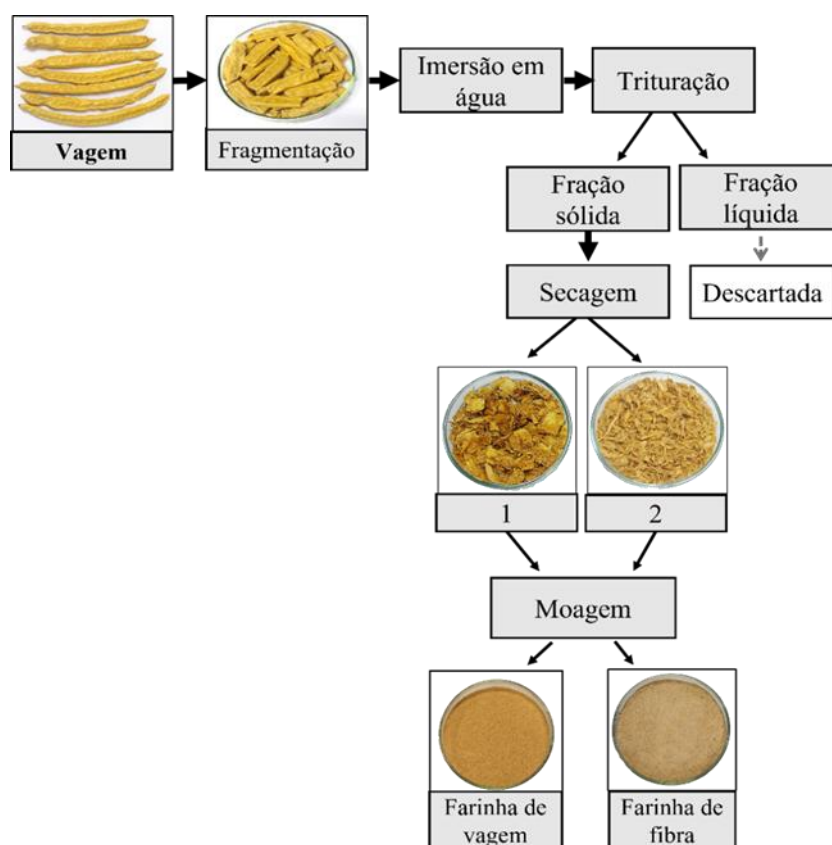
4.2.1.1 Beneficiamento das vagens de algaroba para obtenção de farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB)

A princípio foi realizada a seleção das vagens, eliminando-se as que apresentaram injúrias de natureza mecânica ou microbiológica. Manualmente, as vagens selecionadas foram

fragmentadas e imersas em água em uma proporção de 1:2 (m/v) por 24 horas, durante esse período foi realizada a troca de água a cada 6 horas.

Em seguida para facilitar a separação manual das fibras, as vagens foram trituradas em um liquidificador industrial. Foi obtido uma fração líquida que foi descartada e outra sólida que foi colocada para secar em $30^{\circ} \pm 3^{\circ}$ por aproximadamente 48 horas. Após a secagem, o material foi dividido em duas porções a primeira composta por fibra, capsula e sementes, e a segunda apenas por fibras, que foram trituradas em moinho de facas do tipo Willy com peneira 30 *mesh* e resultaram em farinha de vagem (FV) e farinha de fibra (FB) respectivamente (Figura 7). É válido ressaltar que em todas as fases do beneficiamento o material foi pesado para realização de análises posteriores.

Figura 7. Fluxograma para obtenção de farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB).



Fonte: Autoria própria, 2023

4.2.1.2 Caracterização das farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB)

O cálculo de rendimento de moagem (R) das matérias-primas foi determinado pela proporção de vagem/farinha obtida em relação ao total de matéria-prima inicial, sendo os

resultados expressos em porcentagem de base seca. Os valores foram obtidos de acordo com a Equação 1.

$$R = \frac{(MASSA\ FINAL\ DE\ FARINHA)}{(MASSA\ DE\ VAGENS\ INICIAL)} \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Os resultados de distribuição do tamanho de partículas foram obtidos em granulômetro com espalhamento a *laser* da marca Cilas modelo 1090, utilizando aproximadamente 1g de amostra.

Os padrões de difração de raios X (DRX) das amostras foram determinados em um Difratorômetro da Shimadzu modelo Lab X/XRD-6000, operando com voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA utilizando a radiação $K\alpha$ de cobre como fonte de radiação monocromática. As varreduras foram realizadas no intervalo 2θ entre 2 e 60° , incremento de $0,01^\circ$, velocidade de 1° min^{-1} e utilização de fenda de 1mm.

Para obter os resultados de Espectroscopia na região do Infravermelho (FTIR) as amostras de fibra e farinha (forma de pó) foram prensadas para formação de pastilhas com composição de aproximadamente 1:100 (mg) de amostra: brometo de potássio (KBr), utilizando um Espectrômetro da Shimadzu, modelo IR Prestige-21. As análises foram realizadas no modo de transmitância na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}) com resolução de 4 cm^{-1} .

Os dados de UV-Vis foram obtidos utilizando um Espectrômetro UV-Vis, modelo UV-2600, do fabricante Shimadzu, equipado com esfera de integração. As amostras em pó foram analisadas no modo de absorbância com varredura em comprimento e onda entre de 220 a 1400 nm.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 RENDIMENTO DAS FARINHA DE VAGEM (FV) E DE FIBRA (FB)

O rendimento da FV e FB produzida neste trabalho foi de 85,15% e 47,65%, respectivamente. Ao analisar estes resultados verifica-se que o menor percentual de rendimento obtido para FB é justificável, em razão da remoção manual dos constituintes da vagem como cápsulas e sementes durante o processo de obtenção da farinha.

Considerando os resultados obtidos, observa-se que a vagem de algaroba apresenta um grande potencial de aproveitamento. No entanto, na literatura não foram encontrados estudos sobre o rendimento de FV e FB de algaroba destinadas a produção de embalagens rígidas, fato que reforça a inovação e importância deste estudo.

Na análise do rendimento de matérias-primas oriundas de espécies vegetais vale ressaltar que os percentuais obtidos variam em função dos diferentes estágios de maturação da fruta, condições sazonais e dos processos de extração (SCHELIGA *et al.*, 2018).

4.3.1.1 Análise granulométrica

Nas Figuras 8 e 9 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica das amostras FV e FB obtidas a partir de algaroba (*Prosopis juliflora*).

Figura 8. Curva de distribuição granulométrica da farinha de vagem (FV) de algaroba.

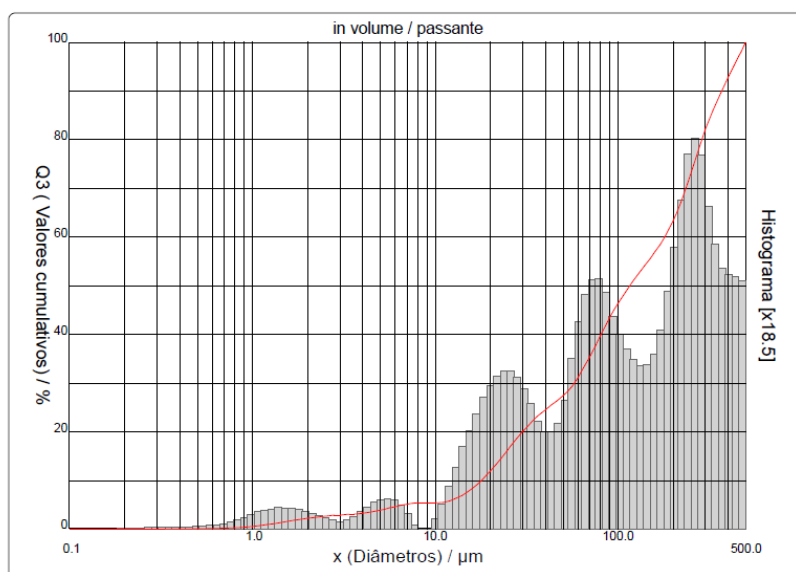
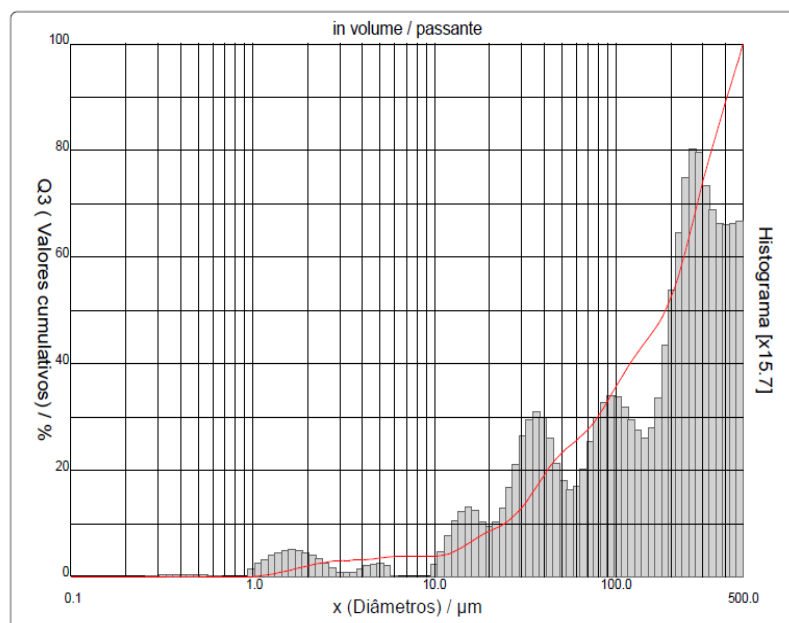


Figura 9. Curva de distribuição granulométrica da farinha de fibra (FB) de algaroba.



Os perfis de distribuição granulométrica das matérias-primas estudadas (FV e FB) (Figuras 8 e 9) classificam-se como polidispersos e obtiveram diâmetro médio de 161,03 μm e 175,22 μm respectivamente. Nos estudos realizados por Gusmão et al. (2016) resultados semelhantes ao deste trabalho foram obtidos, ao também caracterizar farinha de *Prosopis juliflora*.

Controlar a granulometria de matérias-primas utilizadas é de suma importância, uma vez que tamanho de partículas influenciam na qualidade do produto final (PAULI *et al.*, 2019). Pesquisas realizadas por Alharbi *et al.* (2020) relatam que a forma das fibras vegetais influencia diretamente nas propriedades finais dos biocompósitos desenvolvidos e se constitui em um dos fatores relevantes na construção das suas características mecânicas.

Para criação de biocompósitos, podem ser utilizadas fibras na forma moída de diferentes tamanhos, porém quanto menor o tamanho e mais uniforme, maior é a homogeneidade da matriz polimérica e consequentemente melhores são as propriedades do material moldado (GOLMAKANI *et al.*, 2021).

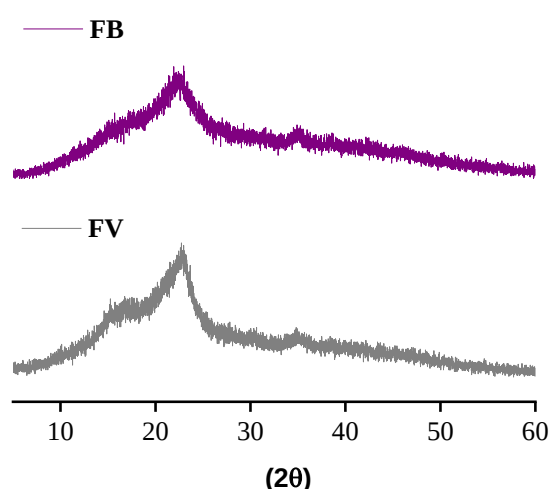
Diante dos resultados apresentados observa-se que em todos os processos que envolvam a utilização de matéria-prima na forma de pó, a padronização do tamanho das partículas é uma etapa necessária, visto que a distribuição e o tamanho das partículas influenciam significativamente nas etapas de produção e na microestrutura do material,

afetando a resistência mecânica, densidade e as propriedades térmicas dos produtos (DUKARSKA *et al.*, 2022).

4.3.1.2 Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 10 estão apresentados os difratogramas das farinhas (FV e FB) oriundas da espécie *Prosopis juliflora*.

Figura 10. Difratogramas das farinhas de vagem (FV) e de fibra (FB) de *Prosopis juliflora*.



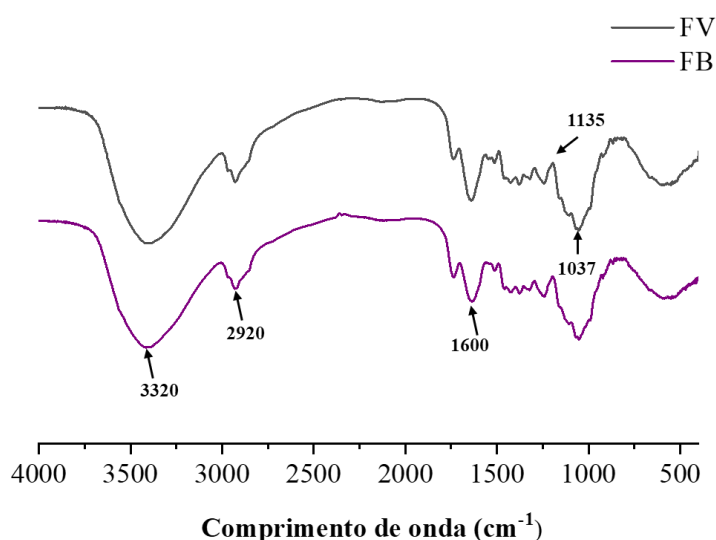
Na Figura 10 observa-se que os padrões dos difratogramas obtidos para FV e FB apresentaram-se semelhantes, com picos largos e muitos ruídos, característicos de materiais semicristalinos. No entanto, na escala de 2θ em torno de 22° verifica-se um pico de maior intensidade, típico de materiais lignocelulósicos que correspondem a cristais de celulose do tipo I que são encontrados nas fibras de plantas (CHIENG *et al.*, 2017). A celulose é formada por regiões amorfas e cristalinas, que a depender do tratamento e da fonte vegetal extraída, apresenta variações no grau de cristalinidade (HERNANDEZ; FERREIRA; ROSA, 2018).

Nos difratogramas de FV e FB apresentados, a presença de halos pode ser explicada pela presença de componentes amorfos na amostra, como a lignina e hemicelulose que resultam em um sistema desordenado com propriedades semicristalinas (GANDARA *et al.*, 2020). Resultado semelhante ao encontrado neste trabalho foi obtido por Bartos *et al.* (2020) ao avaliarem fibras lignocelulósicas extraídas da cana-de-açúcar.

4.3.1.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 11 estão apresentados os espectros de infravermelho por transformada de Fourier das farinhas FV e FB.

Figura 11. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier das farinhas de vagem (FV) e fibra (FB) de *Prosopis juliflora*..



A partir da análise comparativa dos espectros obtidos (Figura 11), observa-se que os grupos funcionais presentes nas farinhas (FV e FB) são semelhantes, apresentando uma ampla banda de absorção na região entre 3600 e 3000 cm^{-1} , com banda intensificada em 3320 cm^{-1} que correspondem a vibrações de alongamento dos grupos O-H. A ocorrência dessas bandas teoricamente é atribuída a interações inter e intra moleculares das hidroxilas presentes nos compostos poliméricos (CICHOSZ e MASEK, 2020).

As bandas observadas em torno de 2920 cm^{-1} estão relacionadas à vibrações do estiramento C-H que podem pertencer à cristalinidade da fibra celulósica ou lignina (RAFIDISON *et al.*, 2020). Nos espectros a banda de absorção que aparece próximo a 1700 cm^{-1} corresponde aos grupos acetil, éteres, aldeídos e ácidos carboxílicos, evidenciando a presença de hemicelulose nas amostras.

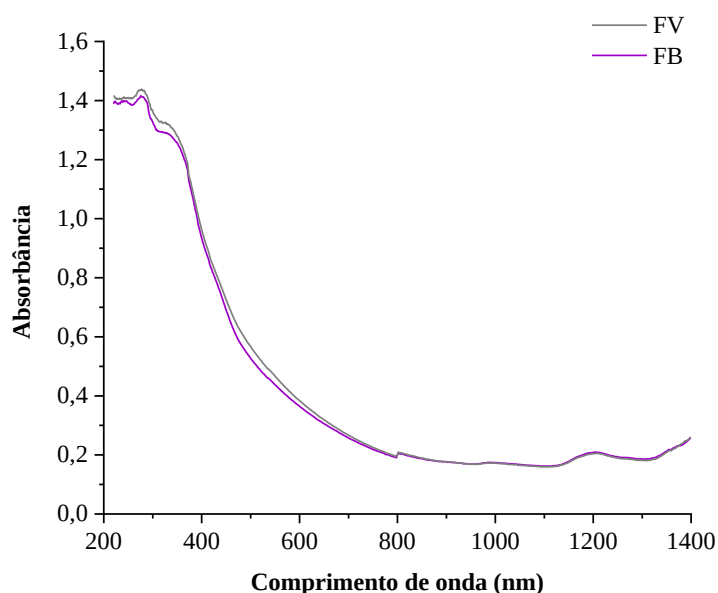
De acordo com trabalho de Chakraborty *et al* (2022). as bandas entre 1600-1400 cm^{-1} observadas nas amostras, são atribuídas a vibrações aromáticas C=C, sendo sua presença associada à lignina. Nos espectros a banda que aparece em 1135 cm^{-1} pode estar relacionada ao estiramento da ligação C-O de grupos carboxílicos e a de 1037 cm^{-1} a ligações glicosídicas

simétricas C-H e vibracional do grupo C-O-C da celulose. Resultados análogos a este trabalho foram encontrados por Ferreira *et al.* (2018) ao avaliar farinhas obtidas de diferentes espécies vegetais.

4.3.1.4 Espectrofotometria na Região do Ultravioleta e Visível (UV-Vis)

Os espectros de absorção ultravioleta das farinhas FV e FB estão apresentados na Figura 12.

Figura 12. Espectros de UV-Vis das farinhas de vagem (FV) e fibra (FB) de *Prosopis juliflora*.



A vagem de algaroba por ser uma leguminosa rica em nutrientes como polissacarídeos, proteínas, lipídeos e minerais, apresentam espectro de absorção em ampla faixa de comprimento de onda. Como pode-se observar na Figura 12 a FB e FV apresentaram uma ampla faixa espectral de absorção entre 220 nm a 700 nm com um máximo de absorção ultravioleta em torno 305 nm.

De acordo com Medeiros *et al.* (2011), polímeros como polissacarídeos exibem sequências de ligações químicas simples e duplas que constituem diferentes bandas de energia devido aos processos de oxidação ou redução que ocorrem nas cadeias poliméricas.

Ao analisar os espectros de UV-Vis da FB e FV identifica-se uma banda de absorção de maior intensidade na região de comprimento de onda em torno de 280 nm característico da presença de lignina. Estudos realizados por Amorim *et al.* (2019) reportaram que bandas em

torno de 280 estão relacionadas a transições eletrônicas $\pi \rightarrow \pi^*$ correspondente ao anel aromático de unidades fenólicas não-conjugadas relacionadas à estrutura química da lignina.

A maior intensidade de absorção encontrada para as farinhas obtidas neste trabalho foi em torno de 305 nm, em que, o incremento na absorbância foi levemente maior para FV quando comparado com FB. Este resultado pode estar relacionado a composição da FV que é constituído por sementes e mesocarpo, estes constituintes são ricos em aldeídos e compostos heterocíclicos, resultando em um máximo de absorbância de UV. Resultados semelhantes a este trabalho foram encontrados por Díaz-Batalla et al. (2017) em que o máximo de absorção ocorreu em torno 294 nm ao caracterizar farinhas cruas e termotratadas de vagens de *Prosopis Laevigata*.

4.4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia aplicada neste estudo foi eficiente para obtenção de farinhas (FV e FB) de algaroba.

Também se verifica que as farinhas estudadas neste trabalho apresentaram estruturas e interações químicas típicas de materiais lignocelulósicos, porém maiores intensidades de absorção de UV-Vis foram encontradas para FV em virtude da moagem integral da vagem de algaroba.

Portanto, observa-se que as farinhas (FV e FB) obtidas e analisadas neste trabalho são de fácil obtenção e apresentam características promissoras com potencial para serem utilizadas como material de reforço no desenvolvimento de novos biocompósitos. Além disso, o aproveitamento destas matérias-primas agrega valor a *Prosopis juliflora*, permitindo que ocorra uma redução da dependência de polímeros sintéticos e minimização dos problemas ambientais gerados pelo seu uso.

CAPÍTULO V

RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS ELABORADOS A PARTIR DAS VAGENS DE ALGARROBA (*Prosopis Juliflora*) (Sw.) DC. PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PLANTAS.

5. INTRODUÇÃO

A produção agrícola em todo o mundo visa a obtenção de plantas vigorosas seja para a produção de alimentos, reflorestamento, ornamentação de ambientes ou mesmo para obtenção de matérias-primas destinadas aos setores de transformação (INUBUSHI *et al.*, 2022). Segundo Haase *et al.* (2021) o processo produtivo destas plantas, em muitos casos, é realizado a partir da produção de mudas em recipientes ou sacos plásticos, fato considerado preocupante em virtude dos problemas causados pelo descarte inadequado destes tipos de materiais no meio ambiente.

Na atualidade a utilização de recipientes plásticos na produção de mudas é considerada uma prática insustentável, uma vez que esse tipo de material é oriundo de fonte não renovável a base de petróleo. Assim, como alternativa para substituir este tipo de material surgem os recipientes biodegradáveis que apresentam vantagens ambientais e econômicas, pois não geram resíduos, não prejudicam o solo devido sua rápida decomposição e, além disso, ao se decomporem podem reforçar o adubo do solo, pois são ricos em carbono e outros nutrientes importantes para o crescimento da planta (FERREIRA, MOLINA e PELISSARI, 2020).

Mwangi, Wagara e Kariuki (2021) ressaltam que a utilização de recipientes biodegradáveis na agricultura ajuda a minimizar os impactos ambientais e contribui para diminuição do uso de sacos e tubetes plásticos no plantio de mudas. Além disso, os recipientes biodegradáveis podem reduzir o tempo de plantio, uma vez que as mudas são plantadas diretamente no solo e por conseguinte necessita de menos mão de obra (HAASE *et al.*, 2021).

De acordo com Gabira *et al.* (2020), outros aspectos favoráveis são observados na utilização de recipientes biodegradáveis como o mais rápido e melhor desenvolvimento das mudas, devido ao menor estresse no momento do plantio, a preservação da integridade das raízes, já que o material é composto de fibras orgânicas, as raízes conseguem ultrapassar as paredes do recipiente, não se restringindo ao interior do mesmo (ZHANG; WANG; CHEN,

2019). Deste modo, é evidente que este tipo de recipiente evita os problemas causados às mudas por sacos e tubetes plásticos, além de contribuir para sustentabilidade do planeta (PARIDA *et al.*, 2021).

No meio acadêmico estudos (ZHANG *et al.*, 2019., TAMODINI *et al.*, 2020., FUENTES *et al.*, 2021) estão sendo realizados, desenvolvidos e testados a respeito de recipientes biodegradáveis para produção de mudas, visando a melhoria das propriedades intrínsecas e extrínsecas do material. Fibras de diversas espécies estão sendo caracterizadas, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens, resultantes das interações formadas dentro da embalagem (TIAN; GAO; LIANG, 2019).

Nesta perspectiva a espécie *Prosopis juliflora* vulgarmente conhecida como algaroba é uma leguminosa com alto valor nutritivo, que produz frutos em forma de vagens ricos em proteínas, fibras, sais minerais, carboidratos e açúcares, que variam de 3 cm a 10 cm de comprimento (TORRES *et al.*, 2020). A algaroba é uma espécie vegetal abundante no nordeste brasileiro por ser capaz de se desenvolver em regiões áridas e semiáridas, ambiente que dificilmente outras leguminosas conseguiriam sobreviver, em razão da escassez hídrica e da baixa permeabilidade do solo (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Os autores Bigne, Puppo e Ferrero (2018) ressaltam que a algaroba apresenta potencial elevado, de modo que vem sendo utilizada para alimentação animal, produção de madeira, carvão vegetal, estacas, álcool, melão, reflorestamento e recentemente aparece como uma possível fonte de matéria prima para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis.

Tendo em vista as características positivas e as utilizações da algaroba, o objetivo desta pesquisa foi produzir e caracterizar recipientes biodegradáveis para produção de mudas, utilizando como matéria-prima a farinha de vagem de algaroba.

5.1 MATERIAL E MÉTODOS

5.1.1 Obtenção da farinha das vagens de algaroba

Neste estudo foram utilizadas vagens maduras de algaroba *Prosopis juliflora* previamente selecionadas, descartando-se as atacadas por insetos e fungos. Com o intuito de facilitar o processo de moagem, as vagens foram manualmente fragmentadas e imersas em água na proporção de 1:2 (m/v) por aproximadamente 24 horas, a cada 6 horas foi realizada a troca de água. Em seguida as vagens foram trituradas em um liquidificador industrial e colocadas

para secar a $30^{\circ} \pm 3^{\circ}$ por aproximadamente 48 horas. Após esse procedimento, as vagens foram encaminhadas ao laboratório e moídas em moinho de facas do tipo willy com peneira 30 *mesh* para obtenção da farinha de vagem (FV).

5.1.2 Produção dos recipientes biodegradáveis para mudas

Baseado em Ferreira, Molina e Pelassari (2020) para elaborar os recipientes biodegradáveis foi produzida inicialmente uma solução adesiva, composta por amido de trigo e água em uma proporção de 1:10 (m/v), que foi aquecida em temperatura entre 60 e 70 °C com agitação manual constante por 30 minutos até a completa gelatinização dos grânulos de amido. Após o resfriamento da solução adesiva, foi adicionado 0,4 mL de ácido acético, à farinha da vagem algaroba, à glicerina e ao fertilizante NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) formulação 10:10:10.

A incorporação do fertilizante nos protótipos foi pensada para ajudar no desenvolvimento da planta, visto que esse tipo de recipiente pode ser plantado junto com a muda. Assim, observou-se, por meio de pesquisas à literatura, que o aditivo que poderia ser testado à priori seria o NPK, pois esse teoricamente auxiliaria na degradação da celulose presente no protótipo e forneceria nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, contribuindo para melhorar o desenvolvimento das mudas.

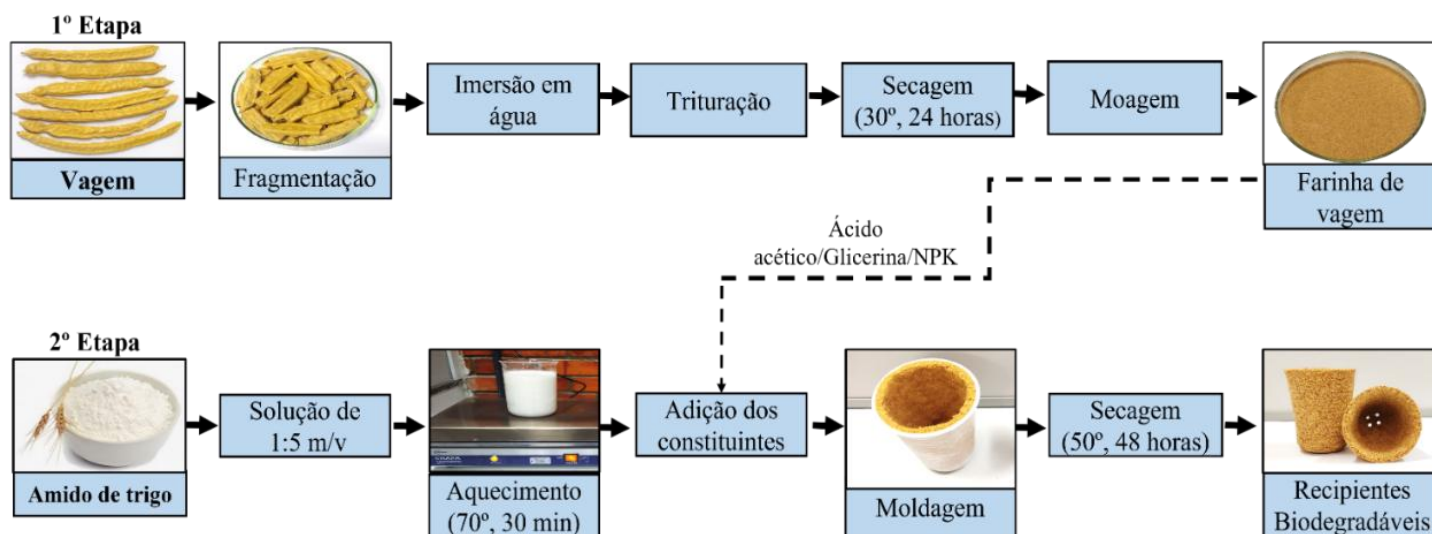
No desenvolvimento dos recipientes foram elaboradas 6 formulações, variando-se a quantidade de farinha e glicerina conforme a Tabela 1. Para preparação de cada formulação os componentes foram misturados manualmente por aproximadamente 5 minutos, até a completa homogeneização, em seguida as misturas foram moldadas manualmente em recipientes plásticos e colocados para secar em estufa com circulação de ar (Modelo MA-SL-100, Solab, Brasil) a 50 °C por aproximadamente 48 horas. Para fins comparativos dois tipos de embalagens comerciais (Sacos plásticos para mudas (SPM) e Vaso plástico para mudas (VPM)) foram utilizadas nas análises de resistência mecânica, ângulo de contato e biodegradabilidade.

Tabela 1. Composição das formulações para produção dos recipientes biodegradáveis.

Formulação	Farinha de Vagem (g)	Solução Adesiva (g)	Glicerina (mL)	NPK (g)
T1	140	150	-	-
T2	70	150	-	-
T3	140	150	10	5
T4	70	150	10	5
T5	140	150	20	5
T6	70	150	20	5

Os parâmetros envolvidos no processo de produção dos recipientes, como a concentração de componentes das formulações (amido, água, farinha, glicerina e NPK), o tempo, a temperatura e a quantidade de massa colocada no molde foram determinadas em ensaios preliminares. Os recipientes biodegradáveis foram fabricados conforme o fluxograma apresentado na Figura 13.

Figura 13. Fluxograma para dos recipientes biodegradáveis.



5.1.3 Caracterização dos recipientes biodegradáveis

Análise visual e tátil foi realizada para cada tipo de recipiente, visando observar a homogeneidade (quanto à presença de deformação mecânica e rachaduras na estrutura) e a manuseabilidade (possibilidade de ser manuseado sem riscos de quebra).

As análises de cristalinidade dos recipientes foram realizadas através de difração de raios x, utilizando-se um Difratorômetro do fabricante Shimadzu modelo Lab X/XRD-6000,

operando com voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA, utilizando a radiação $K\alpha$ de cobre como fonte de radiação monocromática. As varreduras foram realizadas no intervalo 2θ entre 2 a 60° , incremento de $0,01^\circ$, velocidade de 1° min^{-1} e utilização de fenda de 1 mm.

Os espectros de Espectroscopia na região do Infravermelho foram obtidos em um Espectrômetro da Shimadzu, modelo IR Tracer-100. Para realização desta análise as amostras (forma de pó) foram prensadas para formação de pastilhas com composição de aproximadamente 1:100 (mg) de amostra: brometo de potássio (KBr), sendo realizadas no modo de transmitância na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}) com resolução de 4 cm^{-1} .

As amostras foram submetidas a caracterização óptica através da técnica de Espectrofotometria na região do Ultravioleta, Visível (UV-Vis) utilizando-se um Espectrômetro, da marca Shimadzu, modelo UV-2600, equipado com acessório de esfera de integração. Os resultados foram detectados no modo absorbância entre os comprimentos de onda de 220 a 1400 nm.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos universais Shimadzu modelo AG-X com célula de carga de 10 KN. Nesta análise a velocidade utilizada foi de 50 mm/min, sendo a distância inicial entre as garras de 10 mm. Os parâmetros utilizados para os testes foram escolhidos de acordo com a norma da ASTM D882-12 (2012) e foi realizado em triplicata para cada formulação dos recipientes, para isso corpos de prova foram preparados com dimensões conhecidas e fixados na máquina de ensaios mecânicos.

As análises de Ângulo de Contato (AC) foram realizadas em um sistema composto por luz fixa, pipeta de volume regulável e um aparato para amostra. Sobre a superfície de cada amostra uma gota de água destilada foi depositada e imagens foram capturadas com o auxílio de uma câmera do celular iPhone 11 com resolução de 12 MP. As medidas dos valores do ângulo de contato foram realizadas com o auxílio do programa computacional, de acesso livre, ImageJ, através de medidas de diâmetro da base da gota e da altura da mesma, cada gota foi medida 5 vezes.

O percentual de absorção de água foi realizado em triplicata utilizando amostras com dimensões de 15 x 15 mm que foram pesadas e submersas em 50 mL de água destilada durante 1, 5, 10 e 15 min. Após isso foi realizada a remoção do excesso de água com auxílio de papel absorvente, novamente as amostras foram pesadas em balança analítica. A quantidade de água

adsorvida pela amostra foi calculada através da diferença entre a massa inicial e final da amostra e expressa em porcentagem conforme a Equação 2.

$$\% \text{ água absorvida} = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde: mu é a massa da amostra úmida e ms é a massa da amostra seca.

A microestrutura dos recipientes foi analisada através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio eletrônico (modelo Quanta 450, FEI) operando com o princípio de funcionamento de elétrons secundários com módulo ambiental. Amostras dos recipientes foram colocadas sobre uma superfície adesiva de carbono e metalizadas. As micrografias foram obtidas na ampliação de 100X a 10 KV.

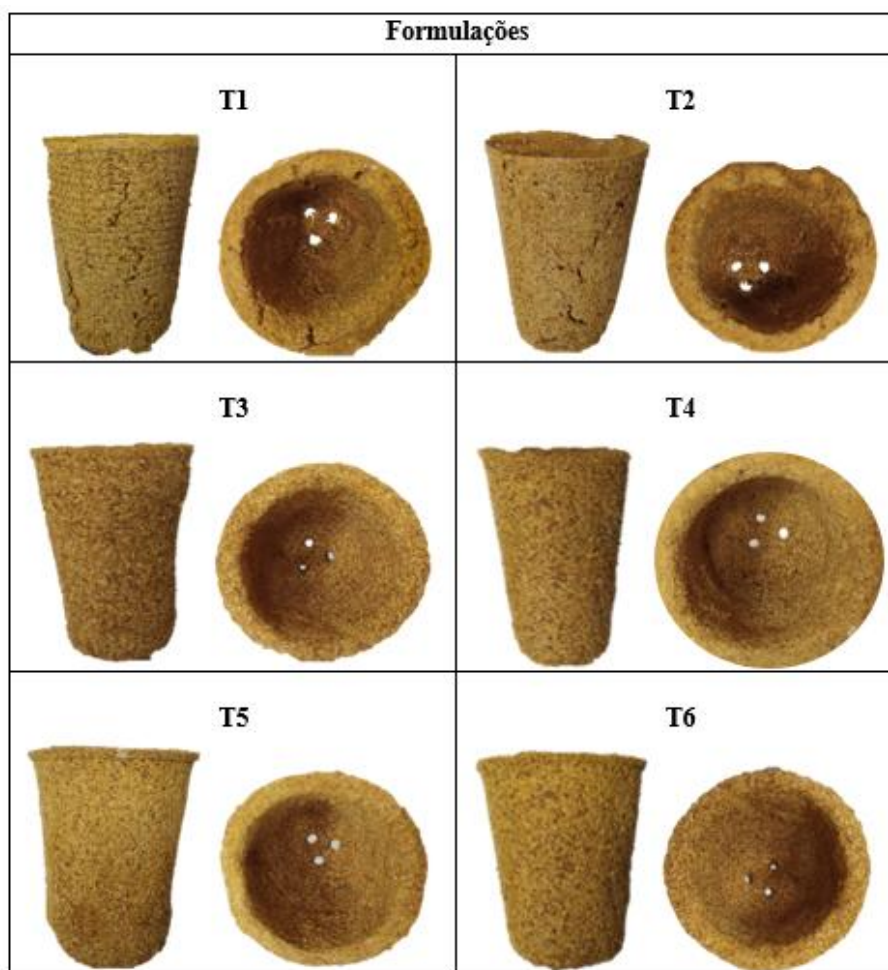
A biodegradabilidade dos recipientes foi determinada através de mensuração da perda de massa do material em exposição ao solo. Amostras medindo 4,0 x 4,0 cm foram enterradas e a cada 3 dias retiradas e pesadas para avaliação da perda de massa durante o tempo que ficaram em contato com o solo.

5.2 RESULTADOS

5.2.1 Aspecto visual e tátil dos recipientes biodegradáveis produzidos

Neste estudo a análise visual e tátil foi realizada, para avaliar a interação dos constituintes (amido de trigo, farinha da vagem de algaroba, glicerina e NPK), bem como a eficiência da metodologia empregada sobre a aparência física dos recipientes biodegradáveis produzidos. A Figura 14 apresenta a aparência física dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Figura 14. Imagens capturadas dos recipientes biodegradáveis produzidos para mudas de plantas.



Na figura 14 observa-se que os recipientes produzidos sem o plastificante glicerina (T1 e T2) apresentaram defeitos de conformação mecânica e rachaduras em sua estrutura, sendo também constatado através das características de manuseio que as misturas iniciais obtidas destas formulações, mostraram-se mais difíceis de serem espalhadas sobre o molde. De acordo com Martinez *et al.* (2020) o agente plastificante interage com o amido de trigo por meio das ligações de hidrogênio, aumentando a flexibilidade da embalagem e, consequentemente, facilitando o seu manuseio. Mediante os resultados obtidos das formulações T3, T4, T5 e T6 observa-se que a glicerina foi um aditivo eficaz para atuar como plastificante e diminuir a natureza frágil das embalagens.

Os recipientes biodegradáveis também foram analisados quanto à manuseabilidade (possibilidade de ser manuseado sem riscos de quebra), sendo pressionados manualmente nos sentidos vertical e horizontal, e nesse aspecto, os recipientes das formulações T3, T4, T5 e T6 apresentaram os melhores resultados, permitindo inferir que os mesmos apresentam maior resistência à manipulação durante sua fabricação e aplicação.

Visualmente, verifica-se que a integridade dos recipientes não foi prejudicada pela adição de NPK as formulações T3, T4, T5 e T6, evidenciando que ocorreu afinidade entre os constituintes. Recipientes biodegradáveis para produção de mudas com aparência integral semelhante a este estudo foram obtidos por Jayna *et al.* (2018). No geral, observa-se que todos os recipientes exibiram homogeneidade quanto à cor, o que pode ser um indicativo de que a metodologia utilizada na etapa de preparação das formulações foi eficiente.

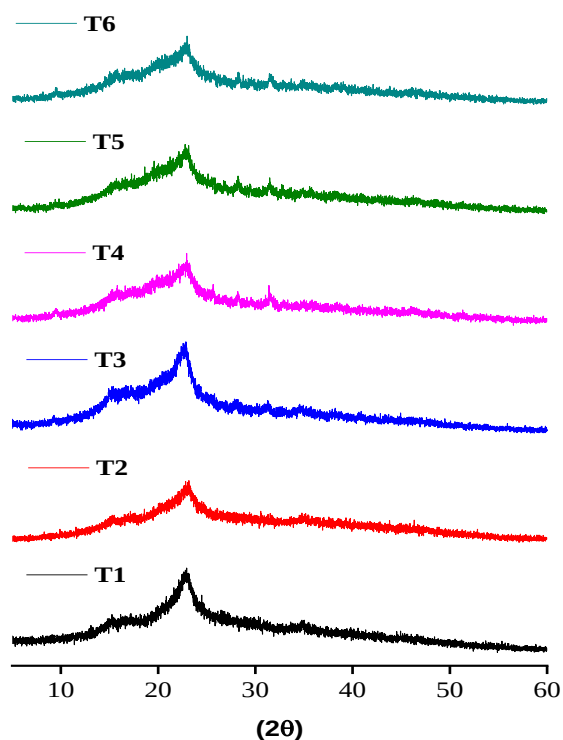
Os resultados alcançados estão em conformidade com Harris *et al.* (2022) que trata a integridade física das embalagens biodegradáveis para mudas de plantas, como sendo uma das mais importantes propriedades e pode ser obtida pela verificação visual e tátil, no qual o recipiente deve apresentar uma superfície contínua e homogênea, ou seja, não deve apresentar rachaduras ou deformidades após o processo de secagem.

Vale reportar que os orifícios observados no interior dos recipientes (Figura 3) foram realizados para facilitar a drenagem da água após a rega. De acordo com Turner *et al.* (2018) os solos utilizados como substrato nos recipientes biodegradáveis, ao serem regados regularmente podem sofrer encharcamento e tornar-se hipóxicos, restringindo o desenvolvimento das raízes de mudas de plantas, portanto, é importante que a embalagem apresente formas de drenar a água.

5.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

Na Figura 15 estão apresentados os difratogramas dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Figura 15. Difratomogramas dos recipientes biodegradáveis fabricados.



O índice de cristalinidade é um parâmetro importante a ser considerado no desenvolvimento de novos produtos, pois pode interferir nas propriedades físicas, mecânicas, químicas e tecnológicas dos materiais (LOMELÍ-RAMIREZ *et al.*, 2018).

Nos difratogramas obtidos (Figura 15) verifica-se que apesar das diferentes formulações utilizadas, os padrões de difração foram semelhantes e característicos de materiais semicristalinos. O pico largo observado no ângulo (2θ) de 22° pode ser atribuído a presença de celulose, bem como a galactomanana, ambos constituintes da farinha da vagem de algaroba. Os resultados aqui apresentados estão coerentes com os encontrados por Engel *et al.* (2019).

Nos perfis de difração (T3, T4, T5 e T6) observa-se que a incorporação do fertilizante NPK às formulações não contribuiu para o aparecimento de picos cristalinos, indicado que não ocorreu interação significativa entre as matérias-primas, isso provavelmente se deu em virtude da baixa concentração de NPK adicionada às formulações e devido ao processo de gelatinização do amido durante o processo de aquecimento, que resultou em materiais semicristalinos cujos padrões de difração são predominantemente na região amorfa.

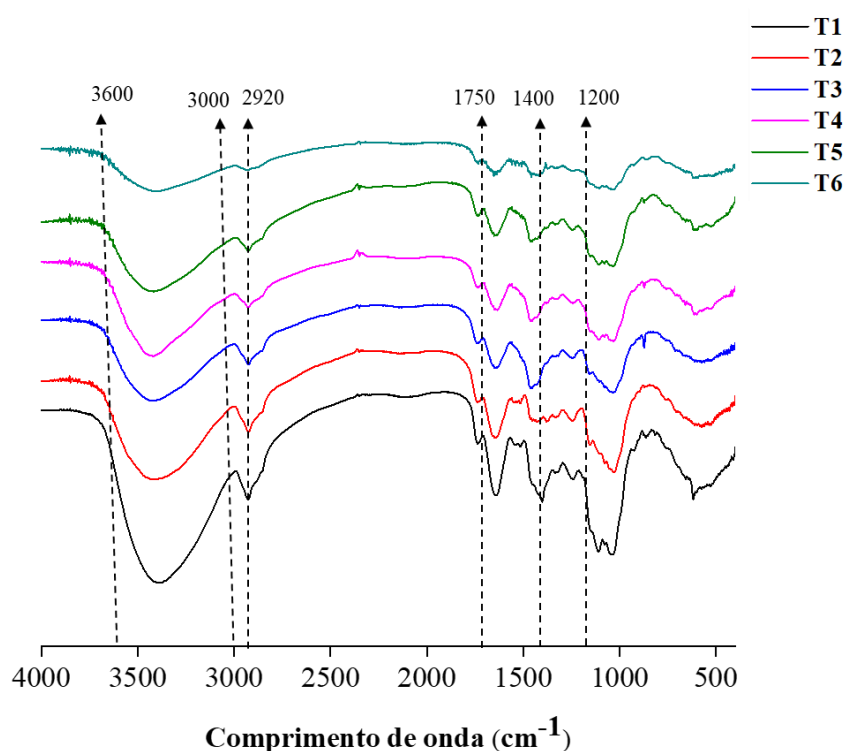
Os resultados indicam que os grânulos cristalinos de amido presentes na solução adesiva foram totalmente destruídos após o aquecimento a 70°C durante a preparação da solução adesiva. De acordo com Xu *et al.* (2018) quando aquecidos em água, os grânulos de

amido sofrem uma transição de fase, que causam ruptura e desorganização estrutural, bem como mudanças ou perdas de cristalinidade.

5.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier foi aplicada neste estudo para identificar possíveis interações entre os componentes (amido, glicerina, farinha de vagem e NPK) utilizados na produção dos recipientes biodegradáveis. Na Figura 16 estão apresentados os espectros de FTIR dos recipientes biodegradáveis obtidos pelas 6 (seis) diferentes formulações.

Figura 16. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier dos recipientes fabricados.



De modo geral, o amido, a glicerina e os compostos lignocelulósicos presentes nos recipientes apresentam grupos funcionais semelhantes, o que consequentemente gerou bandas próximas e espectros similares.

Na Figura 16 todos os espectros obtidos apresentam bandas largas de absorção entre 3600 e 3000 cm^{-1} característica da deformação axial do grupo OH, porém, observa-se a

ocorrência de deslocamento das bandas indicando a existência de interações das ligações de hidrogênio entre os constituintes dos recipientes produzidos (SANTOS *et al.*, 2021).

Nos espectros as bandas observadas em torno de 2920 cm^{-1} com maior ou menor intensidade representam estiramento do tipo C-H e podem estar relacionadas a celulose, lignina e a glicerina presente nas amostras (RAFIDISON *et al.*, 2020). Na região de $1400\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ aparecem vibrações angulares conjugadas de H-C-H e C-O-H também pertencentes ao grupo CH. Estes resultados então em conformidade com os descritos por Santos e colaboradores (2021) ao avaliarem biocompósitos biodegradáveis.

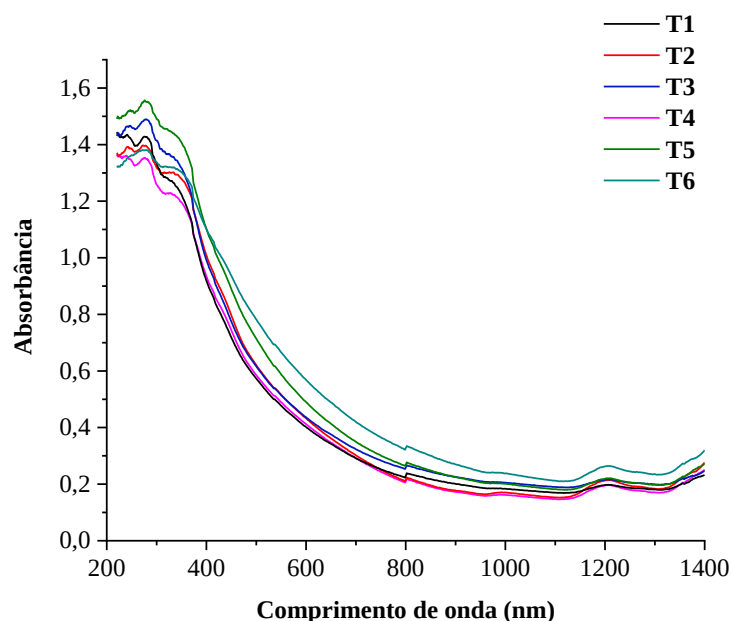
Em todas as formulações verifica-se a presença de bandas em torno de 1540 cm^{-1} associadas a formação do grupo aromático (C-C) que podem corresponder a lignina, já as bandas em torno de 1750 cm^{-1} referem-se aos grupamentos C=O e C-O geralmente encontrados na hemicelulose (FERREIRA *et al.*, 2020). Espectros semelhantes aos obtidos neste trabalho foram encontrados por Silva-Guzmán *et al.* (2018) ao analisar as propriedades de compósitos verdes à base de amido de milho termoplástico reforçados com fibras de cevada.

Ao avaliar de maneira geral os resultados obtidos, é possível observar que mesmo com a incorporação do fertilizante NPK, os perfis dos espectros de infravermelho dos recipientes não foram alterados e sim intensificados em alguns casos, com intensidade aumentada ou diminuída principalmente na banda característica do estiramento O-H ($3600\text{ e }3000\text{ cm}^{-1}$) e na banda característica do estiramento H-C-H e C-O-H ($1400\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$).

5.2.4 Espectrofotometria na Região do Ultravioleta e Visível (UV-Vis)

Os espectros de absorção ultravioleta dos recipientes biodegradáveis estão apresentados na Figura 17.

Figura 17. Espectros de UV-Vis dos recipientes biodegradáveis fabricados.



É possível observar que os recipientes biodegradáveis apresentaram uma ampla faixa espectral de absorção entre 220 nm e 800 nm devido à presença de grupos cromóforos $-C=C$ ou $-C=O$ nos polissacarídeos. De acordo com Rafidison *et al.* (2020) a ampla faixa de absorbância destes polímeros está associada as ligações conjugadas dos monossacarídeos.

Nos espectros obtidos verifica-se que os recipientes resultantes das formulações T1, T3 e T5 apresentaram maior amplitude de absorção se comparado aos T2, T4 e T6 (Figura 17). Este comportamento está relacionado ao aumento da concentração de FV nas formulações e justifica-se pelo o incremento dos teores de lignina nos recipientes. A lignina tem seu potencial de absorção efetivado na faixa da região UV-Vis devido à transição $\pi \rightarrow \pi^*$ de suas ligações duplas $C=C$ (AMORIM *et al.*, 2019). Segundo Cazón *et al.* (2019) a intensidade de absorção de um material depende da probabilidade de interação entre a radiação incidente e as moléculas, como também da diferença entre o estado fundamental e o estado excitado.

Na literatura, estudos (XIE; HUNG, 2018; ASSIS *et al.*, 2020; SANI *et al.*, 2021) utilizando a técnica de UV-Vis estão sendo difundidos com foco em embalagens do tipo filme, destinadas a conservação de alimentos, para avaliar a transparência e opacidade desse material. Contudo, relatos não são encontrados de utilização dessa técnica para caracterizar embalagens biodegradáveis destinadas a produção de mudas de plantas. Destaca-se que, conhecer as propriedades ópticas deste tipo de material é importante, uma vez que no desenvolvimento de mudas, a luz pode interferir ou induzir a germinação de sementes.

5.2.5 Propriedades mecânicas

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados para tensão de ruptura e alongamento dos recipientes biodegradáveis fabricados.

Tabela 2. Tensão de Ruptura (MPa) e Alongamento (%) dos recipientes biodegradáveis fabricados.

Formulações	Tensão de Ruptura δ (MPa)	Alongamento (%)
T1	0,22 $\pm$ 0,04	7,30
T2	0,24 $\pm$ 0,03	9,39
T3	0,50 $\pm$ 0,10	10,23
T4	1,28 $\pm$ 0,28	12,28
T5	0,58 $\pm$ 0,20	16,97
T6	1,13 $\pm$ 0,39	18,08
VPM	22,00 $\pm$ 1,87	20,72
SPM	0,75 $\pm$ 0,03	192,53

Segundo Chacón et al. (2019) conhecer as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos é importante em razão das exigências que estes devem atender no momento de sua aplicação.

De acordo com os resultados obtidos, na Tabela 2 é possível observar que uma redução ocorreu na tensão de ruptura e no alongamento dos recipientes produzidos apenas com farinha de vagem e solução adesiva (T1 e T2). Nestas formulações a redução na resistência mecânica observada, pode ser atribuída à fraca adesão interfacial entre a farinha de vagem e a solução adesiva, indicando a necessidade da incorporação do agente plastificante.

Dentre as amostras analisadas, os recipientes das formulações T4 e T6, com menor proporção de FV, apresentaram maiores resistências a tração, com valores de 1,28 $\pm$ 0,28 e 1,13 $\pm$ 0,39 MPa, respectivamente. Resultado semelhante ao deste trabalho foram encontrados nos estudos de Salim, Rihayat e Riskina (2020), em que a presença de fibras associada ao plastificante glicerina reduziu as forças coesivas na matriz polimérica, diminuiu as características frágeis e consequentemente aumentou a resistência à deformação. Segundo Cruz-Tirado et al. (2019) altas variações nas proporções de fibras podem interferir na expansibilidade e produzir descontinuidade na matriz do amido, resultando em recipientes com menor resistência à quebra.

Em relação ao percentual de alongamento, as amostras T4 e T6 também obtiveram os melhores resultados (14,28 e 16,08%). Entretanto, verifica-se que o aumento na concentração

de glicerina na formulação T6 proporcionou maior flexibilidade do material antes de sua ruptura. Comportamento inverso foi observado para resistência a tração em que o aumento da glicerina resultou em diminuição na resistência do material.

De modo geral, percebe-se que a interação entre os constituintes das formulações T4 e T6 pode ter promovido maior entrelace entre as fibras presentes no material e consequentemente maior compactação dos recipientes. Conforme Juanga-Labayen e Yuan (2021) a maior compactação e, consequentemente, maior homogeneidade de um material faz com que esse apresente maior resistência mecânica. A fim de confirmar essa hipótese, foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para avaliar a microestrutura do material. Comparativamente as embalagens comerciais VPM e SPM apresentaram maior resistência a tração e maior alongamento respectivamente, porém, este resultado não inviabiliza a utilização dos recipientes biodegradáveis obtidos neste trabalho.

Para fins de aplicação os recipientes da formulação T4 apresentam propriedades mecânicas com potencial para substituir os recipientes tradicionalmente encontrados no mercado. Visto que no plantio, transporte e manuseio de mudas, as embalagens utilizadas necessitam de uma maior resistência a tração. Portanto, em termos de resistência mecânica os resultados mostram que a utilização de farinha de vagem (FV) foi eficiente no desenvolvimento de recipientes biodegradáveis.

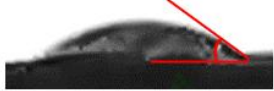
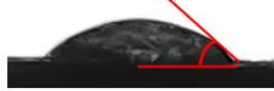
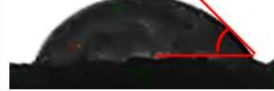
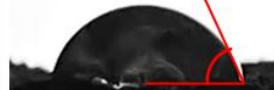
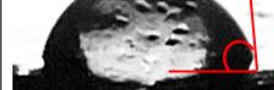
5.2.6 Determinação do ângulo de contato

Tendo em vista que os recipientes biodegradáveis, nas condições de uso, estarão expostos ao contato com água, a análise de molhabilidade é extrema importância para verificar a integridade dos mesmos quando submetidos a essas condições. A Tabela 3 apresenta as médias obtidas para o ângulo de contato das diferentes formulações. A Figura 18 apresenta as imagens dos ângulos de contato formado entre a gota de água e os recipientes produzidos.

Tabela 3. Valores de Ângulo de Contato (AC) dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Formulação	Ângulo de Contato (°)
T1	$43,03 \pm 3,77$
T2	$54,29 \pm 3,86$
T3	$59,88 \pm 2,15$
T4	$82,16 \pm 3,56$
T5	$63,52 \pm 2,96$
T6	$78,16 \pm 2,46$
VFM	$98,92 \pm 4,21$
SPM	$96,90 \pm 3,89$

Figura 18. Imagens da determinação do ângulo de contato dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Formulações			Controle
T1	T2	T3	VPM
$43,03 \pm 3,77$ 	$54,29 \pm 3,86$ 	$59,88 \pm 2,15$ 	$98,92 \pm 4,21$ 
T4	T5	T6	SPM
$82,16 \pm 3,56$ 	$63,52 \pm 2,96$ 	$78,16 \pm 2,46$ 	$96,90 \pm 3,89$ 

Através da análise de ângulo de contato é possível analisar a afinidade seletiva de uma superfície com uma substância líquida e caracterizar o comportamento cinético, em média, da molhabilidade de um material a nível macroscópico (PULLA *et al.*, 2021). Em vista disso esta análise foi aplicada nesta pesquisa para estudar a hidrofobicidade da superfície dos recipientes produzidos.

Na Tabela 3 observa-se que os recipientes biodegradáveis das formulações (T4 e T6) foram os que obtiveram o maior valor do ângulo de contato ($82,16 \pm 3,56$ e $78,16 \pm 2,46$) quando comparado as demais formulações (T1, T2, T3, T5). Porém, observar-se que apesar de próximo o valor do ângulo de contato da formulação T6 foi inferior a T4, de forma que o aumento da concentração do agente plastificante (glicerina) proporcionou uma pequena redução de 4° no ângulo de contato. Esta diminuição pode estar relacionada ao aumento da concentração de grupos polares provenientes da glicerina.

Segundo Xu et al. (2018), a presença deste tipo de plastificante aumenta a molhabilidade da superfície, uma vez que a glicerina apresenta grupos $-OH$ polares, que interagem com moléculas de água via interações de ligação de hidrogênio. Na análise de absorção de água o mesmo comportamento foi observado.

Todos os recipientes analisados nesta pesquisa apresentaram valores de ângulo de contato menores que 90° , conforme apresentado na Figura 18, indicando que as amostras apresentam características hidrofílicas. De acordo com Machado, Benalli e Tessaro (2020) quando o ângulo é menor que 90° , os materiais apresentam molhabilidade considerável e estes são chamados de hidrofílicos. Superfícies hidrofílicas como a deste trabalho, foram obtidas por Li et al. (2019) ao produzirem biocompósitos reforçados com fibras de bambu.

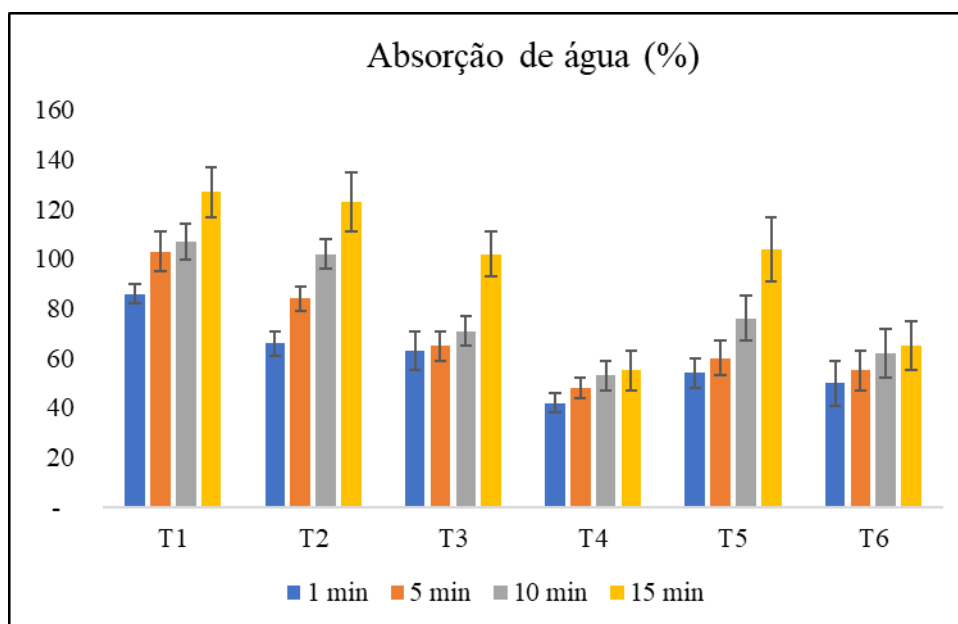
Os valores de ângulo de contato obtidos para SPM e VPM comerciais foram superiores aos encontrados neste trabalho para recipientes biodegradáveis, evidenciando que esses materiais apresentam maior resistência a absorção de umidade e consequentemente menor hidrofiliabilidade. No entanto, os mesmos são produzidos de fonte petrolíferas e acarretam grandes impactos ambientais.

No contexto geral, observa-se que entre os recipientes analisados o da formulação T4 apresenta os melhores resultados em termos de molhabilidade e se destaca com propriedades que possibilitam sua aplicação como embalagens para mudas de plantas.

5.2.7 Capacidade de absorção de água (CAA)

Na Figura 19 estão expressos os resultados de capacidade de absorção de água (CAA) dos recipientes biodegradáveis em diferentes tempos (1, 5, 10 e 15 min).

Figura 19. Capacidade de absorção de água (CAA) dos recipientes biodegradáveis produzidos.



Ao avaliar os resultados obtidos (Figura 19), observa-se que as formulações (T1 e T2), produzidas apenas com solução adesiva e farinha de vagem foram as que apresentaram maior captação de água em todos os tempos, quando comparada às outras formulações. Segundo Fourati *et al.* (2020) este fato pode ser explicado devido à ausência de glicerina na formulação, que facilitou a entrada de água nas fibras de celulose, pois embora o glicerina seja solúvel em água, o mesmo pode lubrificar as fibras de celulose tornando-as mais firmes e contribuir para melhorar a resistência à absorção de água do biocompósito.

As amostras T4 e T6 com menor concentração de farinha de vagem foram aquelas que apresentaram os menores percentuais de capacidade de absorção de água. Conforme Worku *et al.* (2024) a baixa concentração de farinha provavelmente proporcionou recipientes menos porosos com diâmetros de células menores que dificultaram a entrada de água, enquanto as altas concentrações de FV diminuiu a massa de amido na mistura, reduziu a interação da fibra com a matriz e consequentemente produziu uma estrutura menos compacta.

Comportamento similar ao obtido neste trabalho foi observado por Frecz *et al.* (2021), onde o aumento da proporção de fibras à matriz polimérica ocasionou aumento da absorção de água nos biocompósitos. As formulações T4 e T6 quando comparadas entre si, evidenciam que a T4, com menor concentração de glicerina, apresenta os melhores resultados com menor capacidade de absorção de água.

Deste modo, observa-se que a menor concentração de farinha associada aos outros constituintes dos biocompósitos, proporcionou uma melhor homogeneidade do material e fez com que este apresentasse menor capacidade de absorção de água em todos os tempos avaliados. Destaca-se, ainda, que as variações nas proporções de farinha de vagem não prejudicaram a moldagem das amostras e a obtenção dos recipientes, evidenciando a eficiência desta matéria-prima na obtenção de embalagens rígidas.

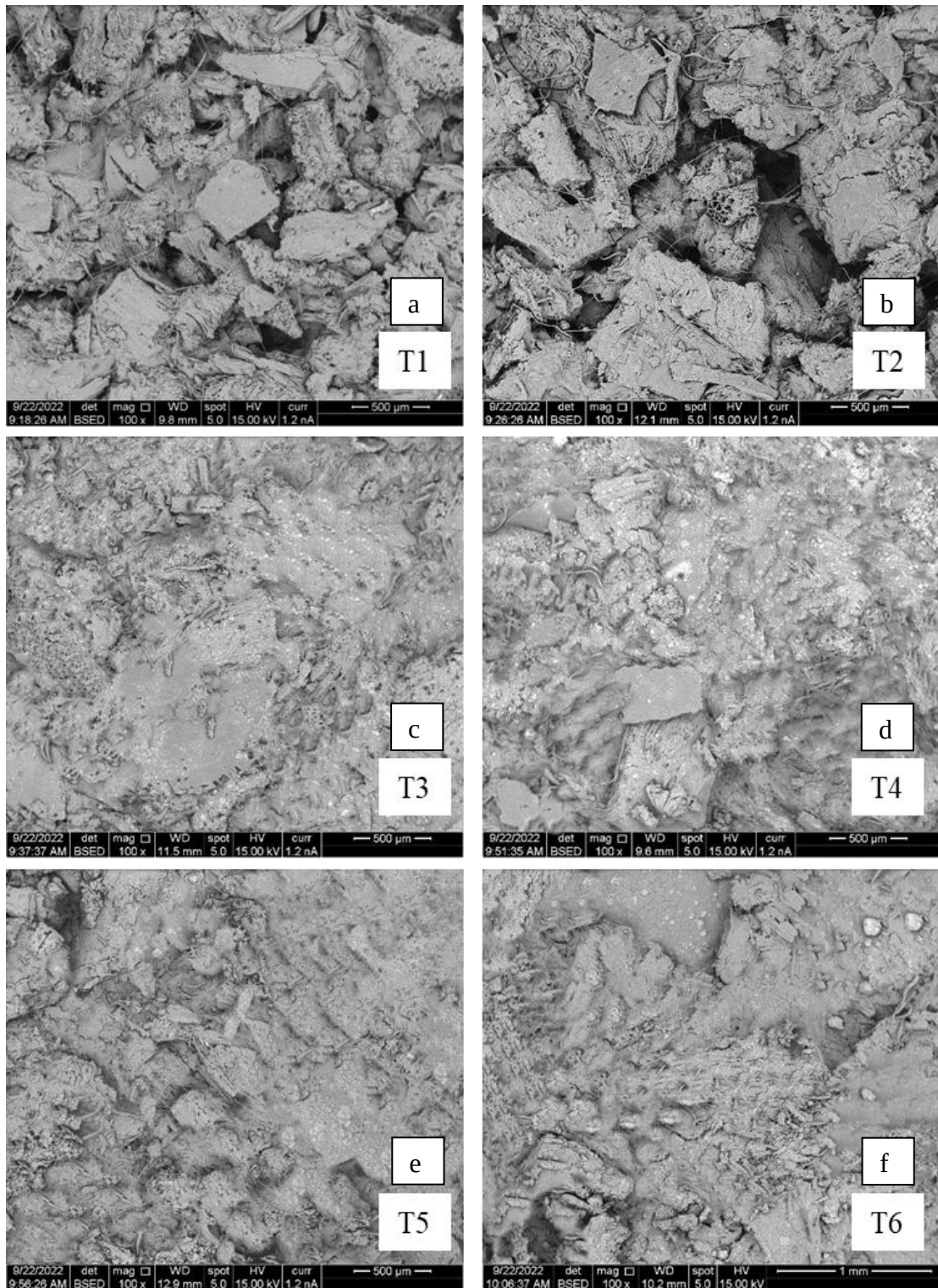
Na Figura 19 observa-se que a maior absorção de água em todas as amostras ocorreu no tempo de 15 minutos. Resultados comparáveis a esta pesquisa foram relatados por Zhang, Wang e Chen (2019) ao avaliar recipientes produzidos com fibra de madeira e fibra de cânhamo.

5.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi aplicada neste estudo para obter informações relevantes a respeito da morfologia de superfície dos biocompositos e assim possibilitar uma melhor discussão dos dados obtidos, sobre a influência das diferentes formulações na microestrutura dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Na Figura 20 estão apresentadas as micrografias de superfície dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Figura 20. Micrografias dos recipientes biodegradáveis produzidos (100x).



Ao analisar os resultados obtidos, observa-se nas micrografias das Figuras 20a/b que na superfície dos recipientes existe a presença de trincas e rachaduras. De acordo com Yu et al (2022) em compósitos biodegradáveis uma fratura frágil ocorre pela rápida propagação de

trincas, com uma pequena deformação plástica no material adjacente à fratura. Nas mesmas micrografias ainda é possível observar espaços vazios (células), formados provavelmente pela evaporação da água durante o processo de secagem, indicando a necessidade da adição do plastificante as formulações.

A literatura relata que embalagens produzidas apenas com amido desintegram-se facilmente quando secas em estufa, devido às fortes ligações de hidrogênio intermolecular entre as cadeias de rede macromolecular da amilose e amilopectina (SAYANG *et al.*, 2016). Deste modo o plastificante glicerina vem sendo utilizado em diversos estudos para melhorar a natureza quebradiça do amido e promover a incorporação da fibra a matriz em embalagens (TREINYTE *et al.*, 2018; BARBUT e HAPER, 2019; BEM *et al.*, 2022; JAYA *et al.*, 2022).

Nas figuras C, D, E e F percebe-se que a morfologia de superfície dos recipientes foi semelhante, de modo que as micrografias mostraram que provavelmente ocorreu homogeneidade e boa adesão interfacial da matriz. Comportamento semelhante foi observado por Ray *et al.* (2021) para compósitos biodegradáveis a base de amido de milho e fibra da folha de tamareira. Considerando que os recipientes são constituídos de diferentes componentes, o fato de as fibras estarem agrupadas com a matriz de amido sugere que ocorreu compatibilidade entre os constituintes. Neste sentido a obtenção de uma matriz homogênea é um bom indicador da integridade estrutural dos recipientes biodegradáveis, que também foi comprovada através da análise visual e tátil.

Segundo Seki *et al.* (2022) utilização de fibras vegetais têm crescido no mercado, pois oferecem agregação de alto valor e opções para desenvolver vários produtos. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais à base de celulose são preferidos principalmente para aplicações leves, como por exemplo as embalagens (SANJAY *et al.* 2019). As fibras vegetais são substitutos eficazes para a troca de fibras artificiais por polímeros de reforço devido ao seu caráter compostável e sustentável (HYNESS *et al.*, 2018).

Através das micrografias das figuras 20c/d/e/f observar-se que os grânulos do fertilizante NPK foi incorporado a matriz dos recipientes. Neste trabalho os recipientes biodegradáveis foram projetados para fornecer os nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio as mudas de plantas à medida que o mesmo se degrada no solo. O fertilizante NPK, é composto por macronutrientes primários essenciais a nutrição de plantas, tendo um papel fundamental no crescimento, desenvolvimento e reprodução das plantas (HARIYADI *et al.*, 2019).

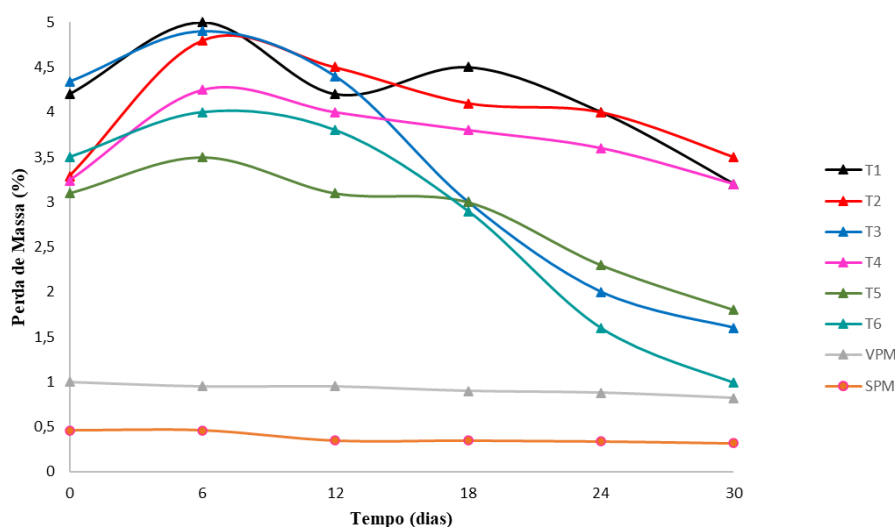
5.2.9 Teste de biodegradabilidade

Os resultados do aspecto visual e da perda de massa em função do peso inicial da amostra e do tempo em que os recipientes biodegradáveis e as embalagens comerciais (VPM e SPM) permaneceram enterradas em recipientes contendo solo vegetal são apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21. Imagens dos corpos de prova submetidos ao teste de biodegradabilidade.

Formulações	Dias					
	0	6	12	18	24	30
T1						
T2						
T3						
T4						
T5						
T6						
VPM						
SPM						

Figura 22. Análise de perda de massa dos recipientes produzidos.



Para analisar de forma mais eficiente a biodegradabilidade dos recipientes, fotos foram tiradas das amostras submetidas ao teste, antes de entrarem em contato com o solo e ao término de cada pesagem. Após 30 dias enterradas, as embalagens produzidas neste estudo se degradaram significativamente alterando sua estrutura e forma inicial, ao contrário das embalagens comerciais (VPM e SPM) como pode-se observar na Figura 21. que permaneceram inalteradas durante todo o período da análise.

Conforme os resultados obtidos, todos os recipientes biodegradáveis produzidos apresentaram aumento de massa nos primeiros dias o que pode ser devido à absorção de água das amostras visto que a terra possui umidade (Figura 22). No decorrer dos dias de análise verifica-se que ocorreu um declínio progressivo no peso das amostras, indicando início do processo de degradação a partir da perda de massa devido à ação dos microrganismos decompositores.

Quantitativamente e visualmente, verificou-se que as amostras da formulação (T6) se desintegraram em pequenos fragmentos e foram as mais susceptíveis ao processo degradativo, apresentando alta perda de massa dos biocompósitos, fato que pode ter sido potencializado pela combinação dos constituintes que favoreceu o crescimento microbiano e consequentemente promoveu uma degradação mais rápida. No Trabalho Tibalia, Wintoko1 e Purnomo (2023) as embalagens biodegradáveis produzidas apresentaram tempo de degradação semelhante a este trabalho.

A biodegradação de um material em um determinado ambiente depende das suas características, como a cristalinidade, mas também da presença de aditivos, como plastificantes,

e das condições ambientais onde o bioplástico está localizado; ou seja, presença de microrganismos, temperatura, umidade e pH adequados (NARANCIC *et al.*, 2020). Neste contexto ao avaliar os recipientes produzidos observa-se que apresentam uma taxa de degradação no solo acelerada, com estimativas de que levariam apenas meses para se degradar completamente no ambiente analisado.

Embora os bioplásticos continuem a ser um nicho com apenas 1% da produção total de plástico, há um movimento no sentido da sua implantação mais ampla, o principal impulsionador deste aumento deve-se à crescente demanda por polímeros biodegradáveis em economias emergentes como Índia, Brasil e China (NARANCIC *et al.*, 2020).

5.3 CONCLUSÕES

A farinha de vagem de algaroba utilizada nesta pesquisa apresentou afinidade com a matriz de amido de trigo e originou recipientes biodegradáveis com boa interação de seus componentes, preferencialmente quando utilizadas em baixas concentrações.

Os recipientes biodegradáveis obtidos das formulações T3, T4, T5 e T6 apresentaram boa aparência e distribuição uniforme das fibras, conforme evidenciado visualmente através da análise de MEV, bem como, boas características de manuseio que permitem sua aplicação de forma prática.

Nesta pesquisa, observou-se que as diferentes concentrações das matérias-primas utilizadas não ocasionaram mudanças significativas no estado estrutural dos recipientes biodegradáveis, além disso, também não influenciaram o comportamento das interações químicas.

Em termos de propriedades mecânicas, verifica-se que os recipientes da formulação T4 apresentaram os maiores valores de tensão de ruptura, com potencial para substituição das embalagens comerciais. Comportamento este que também foi observado na análise de ângulo de contato e absorção de água, em que os recipientes da formulação T4 obtiveram as melhores propriedades de barreira a água.

Com base nos resultados obtidos conclui-se que a farinha de vagem de algaroba apresenta elevado potencial de utilização em biocompósitos de amido e que os recipientes produzidos em contato com o solo podem ser degradados rapidamente, permitindo sugerir ao mercado, uma nova opção de matéria-prima renovável.

CAPÍTULO VI

PRODUÇÃO DE BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADAS COM FIBRAS DE ALGAROA (*Prosopis juliflora*)

6. INTRODUÇÃO

Diante do cenário atual é indiscutível a importância das embalagens na vida moderna para viabilização de produtos à população. Neste sentido, em razão de sua versatilidade as embalagens são amplamente utilizadas por diversos segmentos industriais, em especial na indústria alimentícia estas são consideradas indispensáveis, por desempenharem um papel fundamental no armazenamento, transporte e manutenção da qualidade dos alimentos (FIROUZ; ALDEN; OMID, 2021).

Na comercialização de alimentos, em destaque a de ovos, as embalagens normalmente utilizadas são as de papelão, plástico ou isopor, que na maioria das vezes após o uso, não são recicladas ou reaproveitadas, mas descartadas no meio ambiente (JIAN *et al.*, 2019). Considerando que o ovo é um dos alimentos mais consumidos e comercializados no mundo, por ser uma fonte rica de nutrientes, observa-se que é crescente o acúmulo de resíduos na natureza em virtude do descarte das embalagens sintéticas utilizadas para transportar/armazenar este produto (KOCETKOV; BRASAVA, 2021). Em vista disso, uma inovação para armazenamento, comercialização e transporte de ovos é o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis.

Neste contexto, visando atender as demandas ambientais, estudos mostram que embalagens biodegradáveis são excelentes alternativas para minimizar ou substituir o uso das embalagens convencionais à base de petróleo, visto que são derivadas de fontes renováveis, economicamente viáveis e ambientalmente corretas (SHAIKH; YAQOOB; AGGARWAL, 2021). Este tipo de embalagem quando descartada no meio ambiente pode ser rapidamente degradada por microrganismos e consequentemente reduzir os impactos ambientais.

Na produção de embalagens biodegradáveis os materiais mais utilizados são os de origem agrícola devido à facilidade de obtenção, alta disponibilidade e baixo custo. De acordo com Cabanillas, Nuñez e Tirado (2019) o amido é um dos polímeros naturais mais estudados para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis. Entretanto, na literatura observa-se que

embalagens compostas apenas por amido apresentam estrutura frágil e quebradiça sendo, portanto, necessária a incorporação de novos componentes para melhorar suas propriedades microestruturais, físico-químicas e mecânicas (MIRELES; DÍAZ; MEDINA, 2021).

Neste sentido, fibras vegetais estão sendo incorporadas as matrizes de amido para atuarem como material de reforço e otimizar as propriedades funcionais (SAPUAN *et al.*, 2020). Diante disto, fibras oriundas das vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*) tornam-se uma alternativa interessante para adicionar em compósitos biodegradáveis, visto que essa espécie produz alta quantidade de vagens e apresenta-se amplamente distribuída em todo nordeste brasileiro (SALAMA *et al.*, 2018).

Com base no exposto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar bandejas de ovos biodegradáveis utilizando como matéria-prima a farinha de fibra oriunda da vagem de algaroba.

6.1 MATERIAL E MÉTODOS

6.1.1 Processamento das vagens de algaroba para obtenção de farinha de fibra

Inicialmente, para realizar a separação das fibras, vagens maduras de algaroba foram subdivididas e colocadas em contato com água por um período de 24 horas. Em seguida esse material foi triturado em um liquidificador industrial e a fração sólida resultante desse procedimento foi colocada para secar em uma temperatura de aproximadamente $30^{\circ} \pm 3^{\circ}$ por 48 horas. Após a secagem, manualmente as fibras foram separadas e para obtenção da farinha foram submetidas ao processo de moagem em um moinho de facas do tipo Willy com peneira 30 mesh (Leite, 2018).

6.1.1 Produção das bandejas biodegradáveis

As bandejas foram obtidas por processo de moldagem manual. Inicialmente, foi preparada uma solução adesiva adicionando-se 100 g de amido de trigo a 100 mL de água destilada. Após homogeneização da solução, esta foi submetida a aquecimento em chapa aquecedora da Tecnal, modelo TE-0851 por aproximadamente 30 min à 70°C e agitação suave para evitar a formação de bolhas, visando ocorrer a completa gelatinização do amido (FERREIRA, MOLINA E PELASSARI; 2020). Em seguida, foi resfriada até atingir a

temperatura ambiente e foi adicionado 0,4 mL de ácido acético. A solução adesiva de amido foi misturada a farinha de fibra e a glicerina em diferentes proporções obtendo-se 4 formulações, como mostrado na Tabela 4.

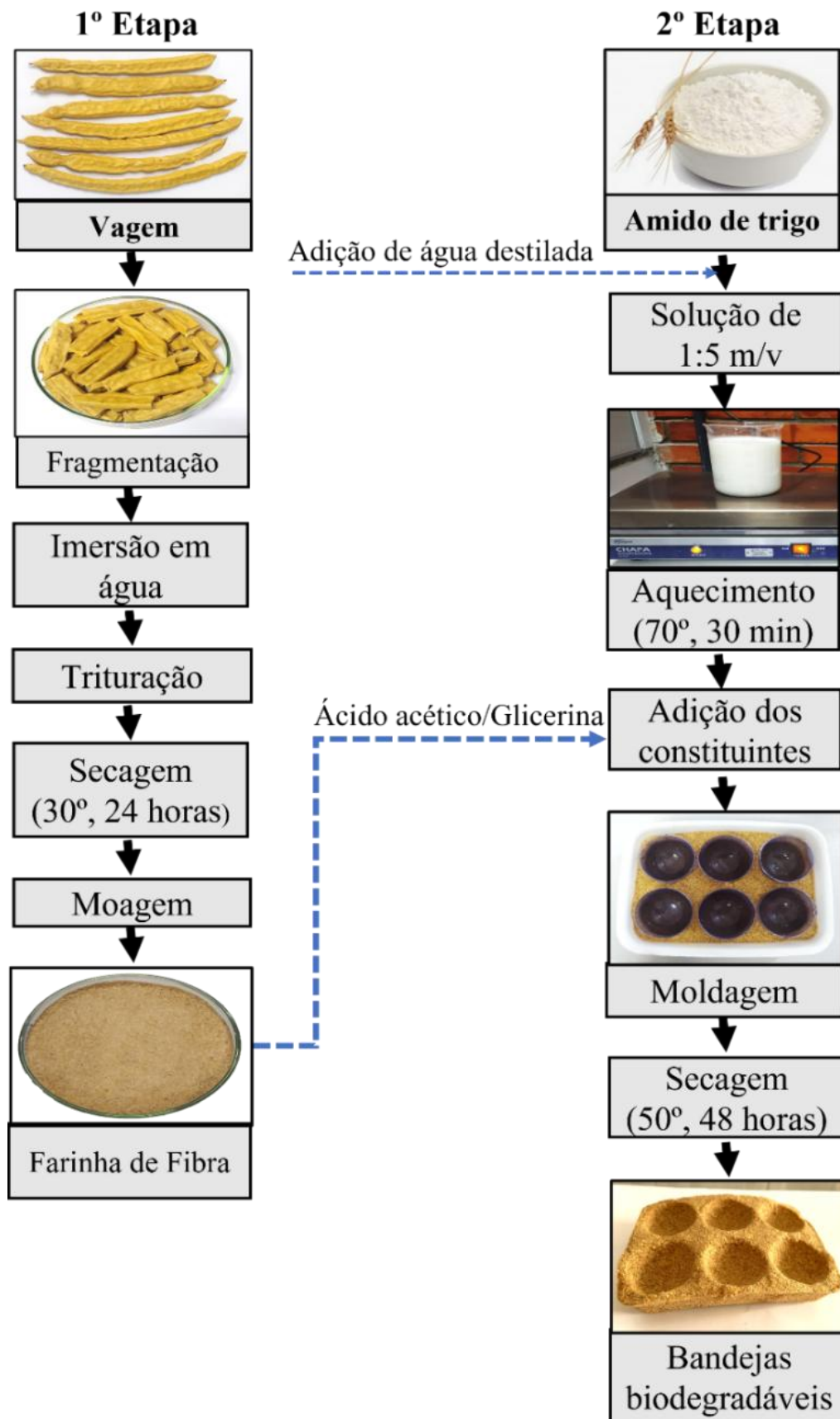
Tabela 4. Composição das formulações para o desenvolvimento de bandejas biodegradáveis.

Formulação	Farinha de fibra (g)	Solução adesiva (g)	Glicerina (mL)
B1	140	300	-
B2	140	300	20
B3	140	300	30
B4	140	300	40

As misturas de amido/fibra/glicerina foram vertidas em bandejas retangulares de isopor (15 x 15 cm), com o auxílio de moldes plásticos foram feitas perfurações para o encaixe dos ovos. A forma do molde e a quantidade da mistura depositada nas bandejas foram determinadas em ensaios preliminares a fim de obter bandejas uniformes e com uma espessura constante. Realizar a padronização destes parâmetros é necessário em virtude de sua influência nas propriedades das embalagens.

Após a moldagem as bandejas foram secas em estufa com circulação de ar (Modelo MA-SL-100, Solab, Brasil) a 65 °C por aproximadamente 48 horas. A fim de comparar os resultados obtidos nas análises de resistência, ângulo de contato e biodegradabilidade foram utilizadas amostras de embalagens comerciais de isopor (EI) e papelão (EP). O fluxograma do processo de produção das bandejas biodegradáveis é apresentado na Figura 23.

Figura 23. Fluxograma ilustrativo do processo de desenvolvimento das bandejas biodegradáveis fabricadas.



6.1.2 Caracterizações iniciais das bandejas biodegradáveis produzidas

As análises de determinação de cristalinidade das matérias-primas e das embalagens obtidas foram realizadas em um Difratorômetro da Shimadzu modelo Lab X/XRD-6000, operando com voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA, emitindo radiação $K\alpha$ de cobre como fonte de radiação monocromática. As varreduras foram realizadas no intervalo 2θ entre 2 e 60°, incremento de 0,01°, velocidade de 1° min⁻¹ e utilização de fenda de 1 mm.

Os dados de Espectroscopia na região do Infravermelho foram obtidos em um Espectrômetro da Shimadzu, modelo IR Tracer100. As amostras na forma de pó foram prensadas para formação de pastilhas com composição de aproximadamente 1:100 (mg) de amostra: brometo de potássio (KBr), sendo realizadas no modo de transmitância na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm⁻¹) com resolução de 4 cm⁻¹.

Para obter os resultados de UV-Vis o equipamento utilizado foi um Espectrômetro UV-Vis, modelo UV-2600, da marca Shimadzu, utilizando o acessório de esfera de integração. As amostras foram analisadas no modelo absorvância com varredura de 220 a 1400 nm.

As propriedades mecânicas foram avaliadas pelo ensaio de resistência à tração de acordo com a norma ASTM D 882-12 (2012) em uma máquina de ensaios mecânicos universais Shimadzu modelo AG-X com célula de carga de 10 KN. A velocidade utilizada foi de 50 mm/min, sendo a distância inicial entre as garras de 10 mm. O teste foi realizado em triplicata para cada formulação da bandeja.

O grau de hidrofiliabilidade das bandejas foi determinado através de medida de Ângulo de Contato (AC) utilizando o método da gota sésil, em um sistema composto por luz fixa, pipeta de volume regulável e um aparato para amostra. As imagens foram registradas com a utilização de uma câmera iPhone 11 com resolução de 12 MP. Com o auxílio do programa computacional, de acesso livre, ImageJ, os valores dos ângulos foram obtidos através da medição da gota. O ensaio do ângulo de contato foi baseado na norma ASTM D7334-08 (2013).

O estudo de absorção de água das bandejas foi realizado de acordo com a norma ASTM D 570. Os corpos de prova com dimensões de 15 x 15 mm foram pesados e imersos em água destilada, à temperatura ambiente. Em intervalos de tempo (1, 5, 10 e 15 min) pré-determinados, foram retirados da água e pesados em uma balança de precisão ($\pm 0,1$ mg). A quantidade de água adsorvida pela amostra foi calculada conforme a Equação 3.

$$\% \text{ água absorvida} = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde: μ é a massa da amostra úmida; m_s é a massa da amostra seca.

As bandejas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação da microestrutura. As amostras foram fixadas sobre uma superfície adesiva de carbono e metalizadas com camada de ouro para melhoria da condutividade. As amostras revestidas foram visualizadas utilizando um microscópio eletrônico (modelo Quanta 450, *FEI*) usando um tensão de 10 kV.

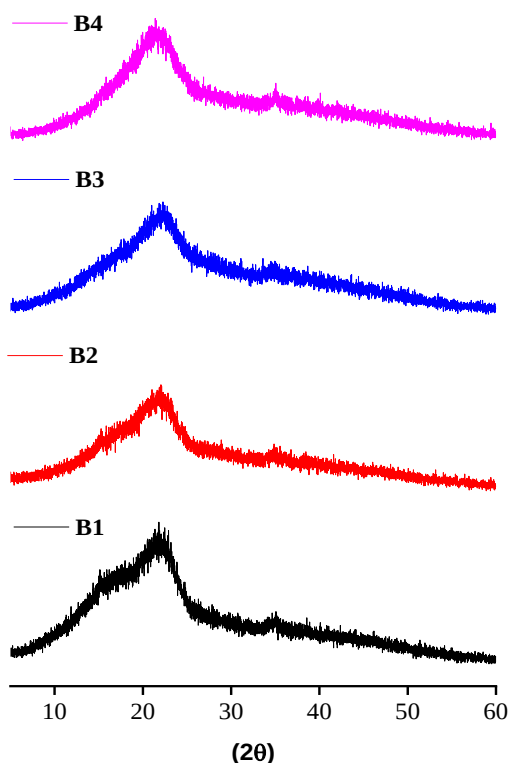
A análise de biodegradabilidade das bandejas foi realizada através de mensuração da perda de massa do material em exposição ao solo. Para tal, foram preparados corpo de prova medindo 4,0 x 4,0 cm, que foram colocados em contato com o solo, a cada 3 dias os mesmos foram retirados e pesados para analisar o percentual de perda de massa.

6.2 RESULTADOS

6.2.1 Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 24 estão apresentados os padrões de difração das bandejas produzidas com as formulações B1 a B4.

Figura 24. Difratogramas das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.



Pode-se observar que todas as formulações apresentam padrões de difração similares, evidenciando que o aumento no teor de glicerina não contribuiu com a formação de novas fases (Figura 24). Observa-se, ainda, que os padrões obtidos são condizentes com os materiais semicristalinos, onde evidencia-se um halo amplo e um pico em torno de 22° relacionado a cristalinidade residual da celulose (NAMPHONSANE *et al.*, 2023). Referente a utilização de glicerina em biocompósitos a literatura relata que o aumento no percentual deste plastificante reduz a cristalinidade relativa, visto que aumenta o espaço entre as cadeias biopoliméricas.

Com relação ao amido, que neste trabalho foi utilizado o de estrutura tipo A (amido de trigo), pode-se observar pelos difratogramas, a ausência dos picos em torno de 15° , 17° , 18° e 23° , evidenciando que o aquecimento realizado no processo de obtenção da solução adesiva acarretou a destruição dos cristais dos grânulos do amido (BARROS *et al.*, 2020). De acordo com Yamaguchi *et al.*, (2019) a rápida secagem da embalagem também acarreta a diminuição de cristalinidade, de modo que o tempo de secagem para as moléculas de amilose, não foi suficiente para cristalizar, apesar de sua alta capacidade de sofrer reordenamento rápido para formar hélices duplas e cristalitos de amilose.

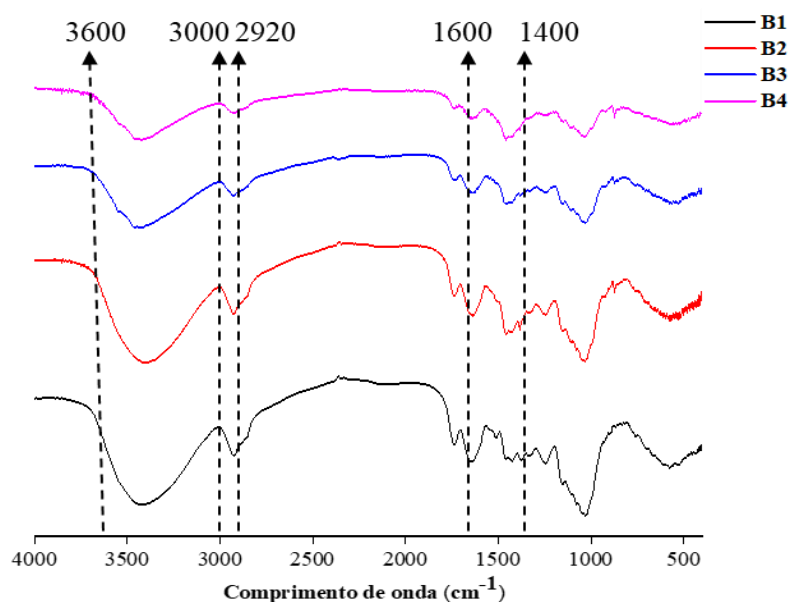
Os principais constituintes das bandejas biodegradáveis são Fibra lignocelulósica e glicerina, esses materiais são orgânicos que naturalmente são irregulares, deste modo, esta

condição consequentemente influenciou nos resultados da análise de DRX das embalagens (JAYA *et al.*, 2022).

6.2.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 25 estão exibidos os espectros de infravermelho das embalagens produzidas neste trabalho.

Figura 25. Espectros de infravermelho por transformada de Fourier das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.



Pode-se observar, pela Figura 25, que as formulações propostas para a obtenção das embalagens não modificaram significativamente os grupos funcionais componentes das amostras, ou seja, amido, glicerina e fibras.

Nos espectros as bandas vibracionais entre 3600 e 3000 cm^{-1} correspondentes ao estiramento do grupo OH é um indicativo da interação entre pontes de hidrogênio e componentes das amostras (WANG *et al.*, 2022).

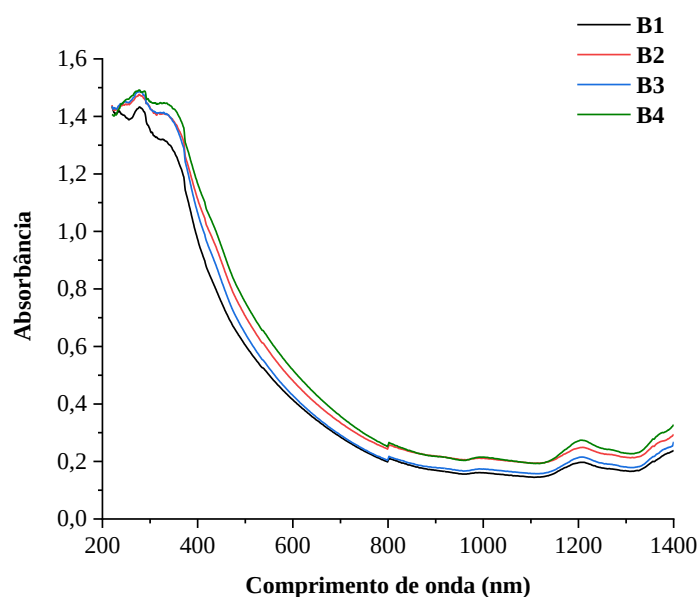
As bandas em torno de 1600 a 1400 cm^{-1} são características das vibrações dos anéis aromáticos da lignina, bem como as bandas em torno de 1720 cm^{-1} referem-se aos grupamentos C=O e C-O encontrados na hemicelulose, conforme observados por Ferreira *et al* (2020).

As bandas em torno de 2920 cm^{-1} estão associadas a presença da ligação C-H (modo estiramento) e podem estar relacionadas a glicerina e a celulose presente nas bandejas produzidas (CHAKRABORTY *et al.*, 2022). A dobra angular do grupo OH das moléculas de água estão evidenciadas nas bandas em torno de 1640 a 1600 cm^{-1} sugerindo a interação da água com os componentes das formulações, enquanto a banda de 1610 cm^{-1} está relacionada a ligação C-OH fora do plano da celulose (SIDORCZUK, *et al.*, 2020). Caracterizações de espectroscopia de infravermelho em embalagens do tipo filme já foram estudadas anteriormente por Leite (2018) e Nascimento (2018) e obtiveram espectros semelhantes a este estudo.

6.2.3 Espectrofotometria na Região do Ultravioleta e Visível (UV-Vis)

Na Figura 26 estão apresentados os espectros de absorção ultravioleta das bandejas biodegradáveis.

Figura 26. Espectros de UV-Vis das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.



A análise por espectroscopia na região do UV-Vis foi realizada afim de comparar as características de absorção das moléculas das bandejas biodegradáveis na região do ultravioleta e no visível (UV-Vis). Neste sentido, pode-se observar na figura 26 que o comportamento das amostras, em termos de absorção na faixa espectral do UV-Vis (220 nm a 1400 nm) foi similar, não evidenciando grande influência da incorporação do teor de glicerina nas amostras (Figura 26).

A literatura relata que compreender a ação da luz nas propriedades das embalagens de alimentos é um parâmetro importante, visto que a luz pode interferir sobre a oxidação e degradação dos compostos nutricionais do alimento embalado (EDIYILYAM *et al.*, 2021). Deste modo, embalagens opacas como as obtidas neste trabalho ou que contenham ingredientes que absorvam luz no espectro UV-Vis, como por exemplo os compostos antioxidantes, são uma alternativa a fim de prevenir reações de deterioração e consequentemente preservar os nutrientes, a cor e o sabor dos alimentos (WHANG *et al.*, 2022).

Neste trabalho as técnicas de caracterização aplicadas indicam que as embalagens desenvolvidas são capazes de transportar os ovos do campo até o mercado, ao mesmo tempo que retarda as reações físicas e químicas nos ovos durante o armazenamento prolongando a vida útil de prateleira.

6.2.4 Propriedades mecânicas

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados de resistência mecânicas das embalagens biodegradáveis de ovos desenvolvidas.

Tabela 5. Tensão de Ruptura (MPa) e Alongamento (%) das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.

Formulações	Tensão de Ruptura δ (MPa)	Alongamento (%)
B1	0.52 ± 0.27	5,37
B2	0.81 ± 0.03	9,94
B3	$1,40 \pm 0.20$	17,53
B4	$0,97 \pm 0.20$	18,57
EI	6.48 ± 0.39	25,02
EP	11.95 ± 1.87	5,53

Analisando de modo geral os dados da tabela 5, é possível verificar que os valores de resistência a tração e alongamento se elevam, à medida que a concentração do plastificante aumenta. Porém, constata-se que a maior concentração de glicerina nas formulações B3 e B4 produziu bandejas mais resistentes e flexíveis, enquanto que a ausência do plastificante na formulação B1 ocasionou fragilização e diminuição das propriedades mecânicas. ($1,40 \pm 0.20$ e 17,53/ $0,97 \pm 0.20$ e 18,57).

Os resultados indicam que a interação entre a fibra vegetal e a matriz de amido, foi intensificada pela adição da glicerina, mostrando que a presença do agente plastificante

favoreceu o movimento das cadeias poliméricas formando uma estrutura mais elástica. Segundo Mustapha e Wan, (2022) a glicerina proporciona o aumento da elasticidade, porque possui capacidade de reduzir os hidrogênios internos das ligações, para aumentar a distância intermolecular.

Os pesquisadores Gani e Kusumayanti (2022) encontraram resultados semelhantes a este trabalho, ao avaliar o efeito da incorporação de glicerina em embalagens biodegradáveis produzidas com fibra de milho e amido de sagu, confirmando que o aumento da concentração de glicerina foi capaz de melhorar as propriedades mecânicas do material estudado. Portanto, a utilização de agente plastificante (glicerina) no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis é uma alternativa para promover interface fibra/matriz e aumentar a resistência do biocompósito.

A resistência mecânica dos biopolímeros é influenciada pela coesão dos constituintes da matriz polimérica, uma vez que a formação de ligações fortes e/ou numerosas entre cadeias poliméricas resultam em forte coesão, o que dificulta sua separação (SPADA; JASPER; TESSAR, 2019). Neste sentido observa-se que a utilização de fibras das vagens de algaroba também pode ter contribuído para melhoria das propriedades de resistência, visto que durante o processo de secagem das embalagens as fibras se entrelaçam e originam uma rede estrutural compacta (FERREIRA *et al.*, 2020).

Para fins de comparação observar-se que embalagens comerciais EI e EP foram as que obtiveram os maiores valores de resistência, no entanto sua utilização geram grandes quantidades de resíduos e provocam sérios impactos ambientais.

Considerando que a estrutura das embalagens biodegradáveis geralmente é frágil, o aumento dos valores nas propriedades mecânicas obtidos neste trabalho foi satisfatório, pois representam um aumento da resistência do material para as condições de fabricação interna e aplicação. Para o consumidor, significa que bandejas produzidas terão maior resistência às condições de estocagem, transporte e manuseio, bem como a quedas e estiramentos durante o processo de uso.

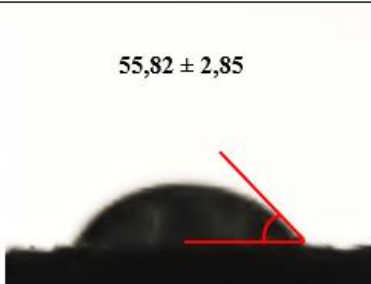
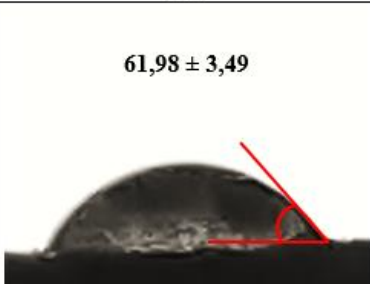
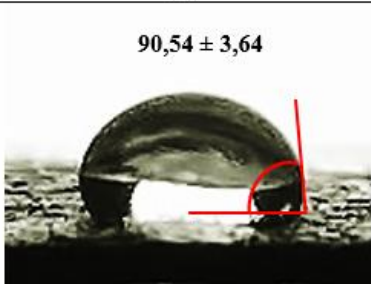
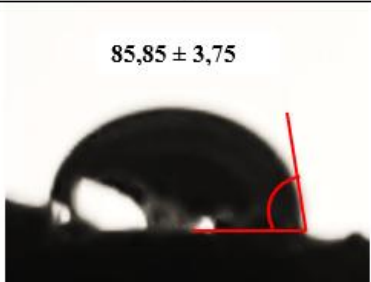
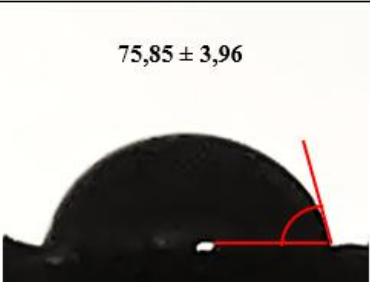
6.2.5 Determinação do ângulo de contato

Na Tabela 6 estão apresentados os valores dos ângulos de contato das diferentes formulações. Na Figura 31 estão apresentadas as imagens dos ângulos de contato formado entre a gota de água e as superfícies das bandejas de ovos biodegradáveis.

Tabela 6. Valores de Ângulo de Contato (AC) das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.

Formulação	Ângulo de Contato (°)
B1	55,82 ± 2,85
B2	61,98 ± 3,49
B3	85,85 ± 3,75
B4	75,85 ± 3,96
EP	90,54 ± 3,64
EI	97,85 ± 2,68

Figura 27. Imagens capturadas da determinação do ângulo de contato das bandejas de ovos fabricadas.

Formulações		Controle
B1	B2	EP
55,82 ± 2,85 	61,98 ± 3,49 	90,54 ± 3,64 
B3	B4	EI
85,85 ± 3,75 	75,85 ± 3,96 	97,85 ± 2,68 

Segundo Hassani et al (2020) o ângulo de contato (CA) da água é uma das propriedades básicas de umectação dos materiais de embalagem e é uma medida da hidrofiliicidade ou hidrofobicidade do material de superfície. Na literatura ângulos de contato maiores que 90° indicam que o material analisado apresenta natureza hidrofóbica e quando o ângulo é menor que 90° o material possui propriedades hidrofílicas (NIU et al., 2018).

Diante dos resultados obtidos na Tabela 6, observar-se que o ângulo de contato das bandejas elaboradas neste trabalho, variou de 55,82° ± 2,85 a 85,85° ± 3,75 e que a bandeja resultante da formulação B3 foi a que apresentou o maior valor de ângulo de contato, indicando

que a superfície desta bandeja possui uma menor afinidade com a água. Este resultado pode ser corroborado com a análise da capacidade de absorção de água, pois a mesma mostra que a bandeja da formulação B3 absorve menos umidade quando comparada as demais formulações.

Deste modo percebe-se que a interação por ligações de hidrogênio entre o amido, a fibra da vagem de algaroba e a glicerina pode ter contribuído para estabilização da matriz hidrofílica do amido, além de proporcionar redução dos grupos polares disponíveis para ligação com a água (MACHADO et al., 2020).

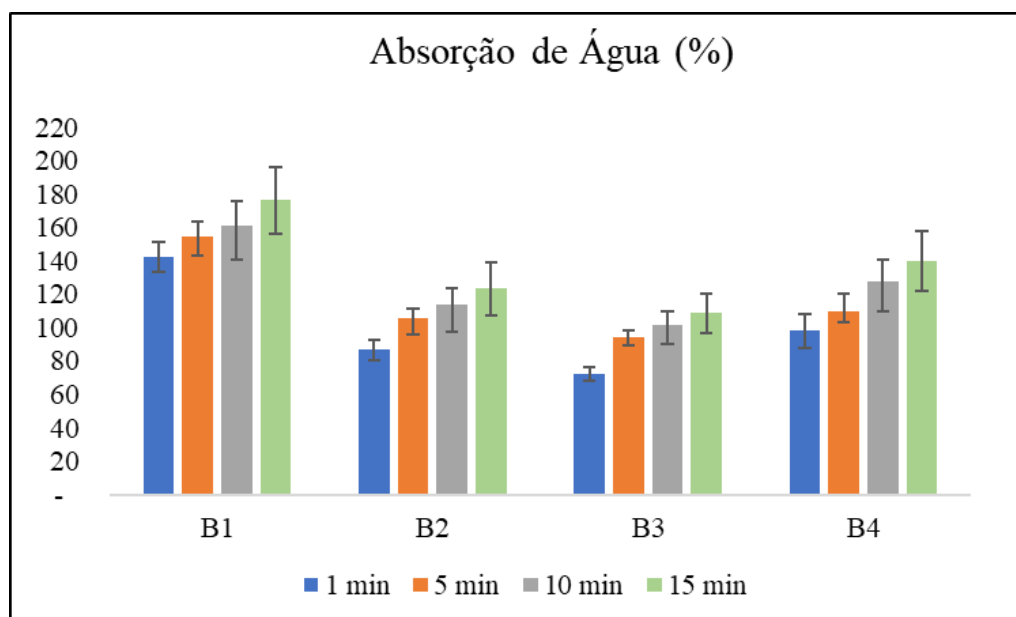
Outro fator relevante a ser mencionado é que fibras vegetais são ricas em lignina, um componente de natureza hidrofóbica que ao ser adicionado em compósitos influenciam na absorção de água, pois atuam como hidrorrepelente, devido à existência de cadeias de hidrocarbonetos apolares e anéis aromáticos em sua estrutura (KORDKHEILI e PIZZI., 2020). Resultados análogos a este trabalho foram encontrados por Moreno et al (2020) ao utilizar fibras de cana-de-açúcar na produção de embalagens biodegradáveis.

Comparativamente, os valores de ângulo de contato das embalagens comerciais foram superiores aos encontrados neste trabalho para bandejas biodegradáveis (Figura 27), evidenciando que estes materiais apresentam maior resistência a absorção de umidade e consequente são mais hidrofóbicos, fato já esperado, porém os mesmos são fabricados de fontes não renováveis que acarretam danos ao meio ambiente. Neste contexto, os resultados sugerem que estudos de modificação estrutural devem ser realizados a fim de melhorar as características de molhabilidade das embalagens biodegradáveis.

6.2.6 Capacidade de absorção de água (CAA)

Na Figura 28 estão apresentados os resultados da capacidade de absorção de água (CAA) das bandejas de ovos biodegradáveis em diferentes tempos (1, 5, 10 e 15 min).

Figura 28. Capacidade de absorção de água (CAA) das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas.



A capacidade de absorver água de bandejas biodegradáveis é uma importante propriedade que define a aplicabilidade do material, sendo desejável que a embalagem produzida apresente baixa capacidade de absorção de água, pois a mesma pode se desintegrar durante o armazenamento, transporte e manuseio e consequentemente possibilitar a prolongação da vida de prateleira dos alimentos, neste caso específico de ovos (TIRADO *et al.*, 2019).

Na figura 28 observa-se que a bandeja obtida da formulação B1, foi a que apresentou o maior percentual de absorção de água em todos os tempos avaliados, este resultado provavelmente ocorreu pela ausência de glicerina na formulação e suscetibilidade dos grânulos de amido em água. De acordo com Agarwal e colaboradores (2021) embalagens biodegradáveis produzidas com amido sem a presença de plastificante são mais sensíveis a umidade, pois as moléculas de água afetam as ligações de hidrogênio do amido, enfraquecendo-as e reduzindo suas propriedades funcionais.

Nas formulações B2, B3 e B4 verifica-se que a incorporação de glicerina as embalagens, ocasionou redução na absorção de água, em destaque a formulação B3 foi a que apresentou os melhores resultados em termos de absorção. A literatura relata que a adição de agentes para aumentar a hidrofobicidade do sistema, bem como as interações feitas entre a fibra e a matriz via pontes de hidrogênio, contribuem para diminuir a disponibilidade de funções hidrofílicas que interagem com a água e, assim, reduzem a entrada de água na embalagem (CAZÓN;

VÁZQUEZ e VELAZQUEZ. 2018). Para todas as formulações, verifica-se que o percentual de absorção de água foi maior no tempo de 15 minutos.

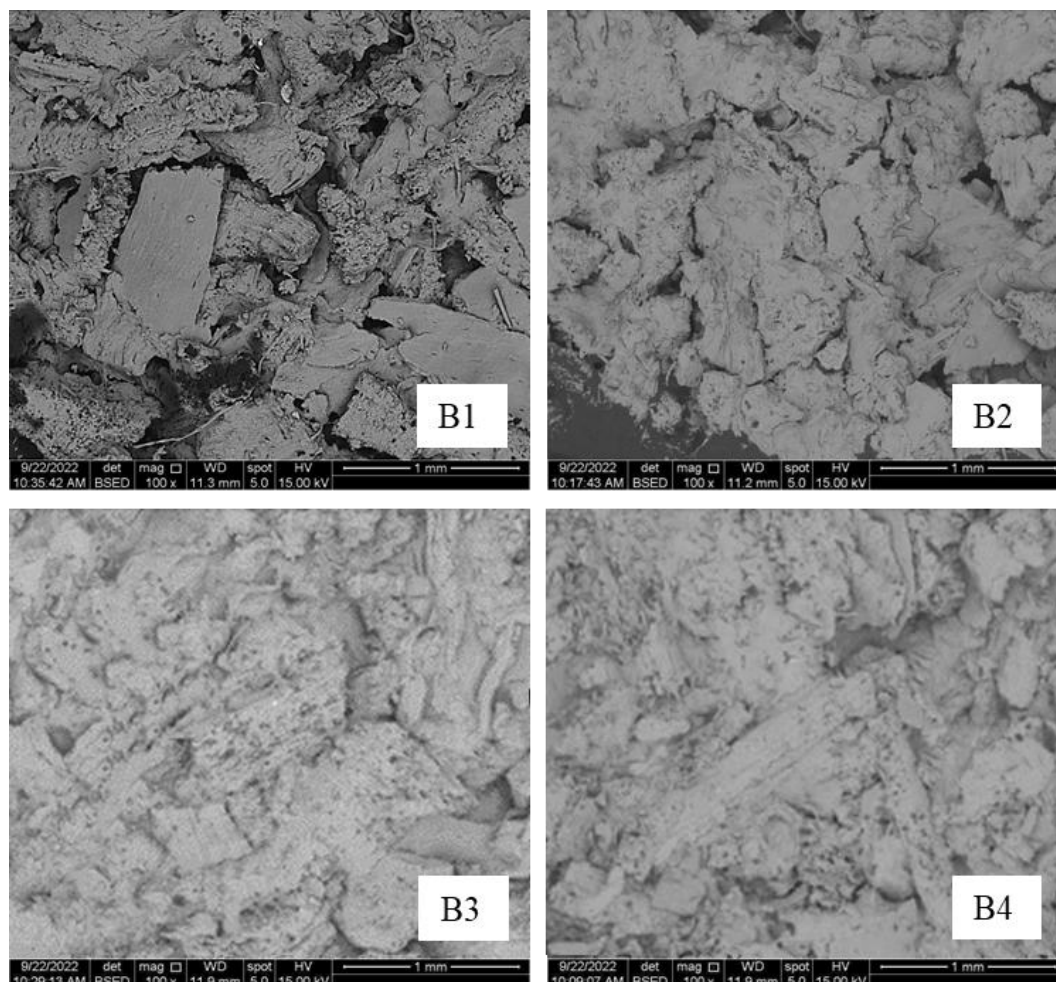
Diversos trabalhos avaliam a influência da adição de glicerina nas propriedades de absorção de água em embalagens do tipo filme (KARIM et al., 2022; MARINO et al., 2022; ABDULLAH e DONG, 2019; CHANTAWEE e RIYAJAN, 2019), no entanto, em embalagens do tipo bandeja estudos recentes são escassos e nem sempre os resultados encontrados apresentam concordância, visto que as modificações estruturais induzidas pelo glicerina para produção de embalagens rígidas são de natureza complexa. Contudo, conhecer as propriedades de absorção de água de embalagens do tipo bandeja é importante, pois permite prever como o material irá se comportar sob diferentes condições de uso.

6.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi aplicada neste estudo para identificar características como: homogeneidade do material, estrutura das camadas, espaços vazios e suavidade da superfície.

A Figura 29 apresenta as micrografias de superfície das bandejas produzidas.

Figura 29. Micrografias das bandejas de ovos biodegradáveis fabricadas (100x).



Na Figura 29 é possível observar que as bandejas biodegradáveis resultantes das formulações (B1 e B2) apresentaram superfície heterogênea e irregular, a qual foi visualmente modificada após a adição do plastificante glicerina nas concentrações de 30ml e 40ml. As micrografias das superfícies dos materiais demonstraram que a adição do plastificante pode alterar a regularidade da matriz polimérica e influenciar na sua homogeneidade.

Através das micrografias verifica-se que as bandejas das formulações (B3 e B4) apresentaram uma superfície com característica contínua, homogênea, sem poros e rachaduras, ou seja, mostraram-se íntegras e com melhor dispersão das fibras, frente às demais. Os resultados obtidos indicam que no processo de formação da bandeja, através da secagem em estufa, a glicerina mantém as fibras dentro da matriz de amido. Antes da mistura dos constituintes que formam a bandeja, o amido passa pelo processo de gelatinização, fazendo com que também durante a secagem, a água evapore e as fibras incorporadas se tornem parte da

estrutura da bandeja. Estrutura de superfície de bandejas semelhantes a este trabalho também foi visualizada por Lopes *et al.* (2022).

No setor de embalagens as características frágeis do amido limitam sua aplicação em escala industrial, no entanto, para melhorar a processabilidade e as propriedades funcionais do amido, a literatura relata que o mesmo é convertido em termoplástico pela incorporação de um ou mais plastificantes seguidos de mistura com biopolímeros em temperatura elevada (SURENDREN *et al.* 2022). Os sistemas de mistura termoplástico à base de amido com produtos biodegradáveis os torna comparável com os polímeros convencionais, economicamente viáveis e ambientalmente corretos.

A nível molecular a plastificação é usada para alterar a estrutura do amido sob temperatura e cisalhamentos elevados, sendo assim, a fragilidade do amido nativo é superada, aumentando a mobilidade da cadeia macromolecular e a processabilidade (SURENDREN *et al.* 2022). Para alcançar uma plastificação eficiente, o tipo e a concentração dos plastificantes desempenham papéis importantes.

A maior presença de defeitos nas bandejas (B1 e B2) dificulta a aplicação e manuseio das mesmas. Dessa forma, foi constatado que adição de 30 e 40ml de glicerina foram as melhores concentrações dentre as avaliadas que resultou em bandejas com boa expansão e menos imperfeições. Portanto investigações futuras deverão explorar as aplicações potenciais destas bandejas biodegradáveis, que poderiam servir como embalagens para frutas, vegetais, produtos de panificação, entre outros.

6.2.8 Teste de biodegradabilidade

Na literatura a biodegradação é definida como a mineralização de material orgânico por microorganismos (por exemplo, fungos e bactérias), que eventualmente resultam nos produtos finais dióxido de carbono e água em circunstâncias aeróbicas (PALMAN *et al.*, 2021). Neste estudo foi aplicado o teste de biodegradação para avaliar o aspecto visual e a perda de massa em função do tempo das embalagens produzidas como é apresentado nas figuras 30 e 31.

Figura 30. Imagens das bandejas biodegradáveis de ovos submetidas ao teste de biodegradabilidade.

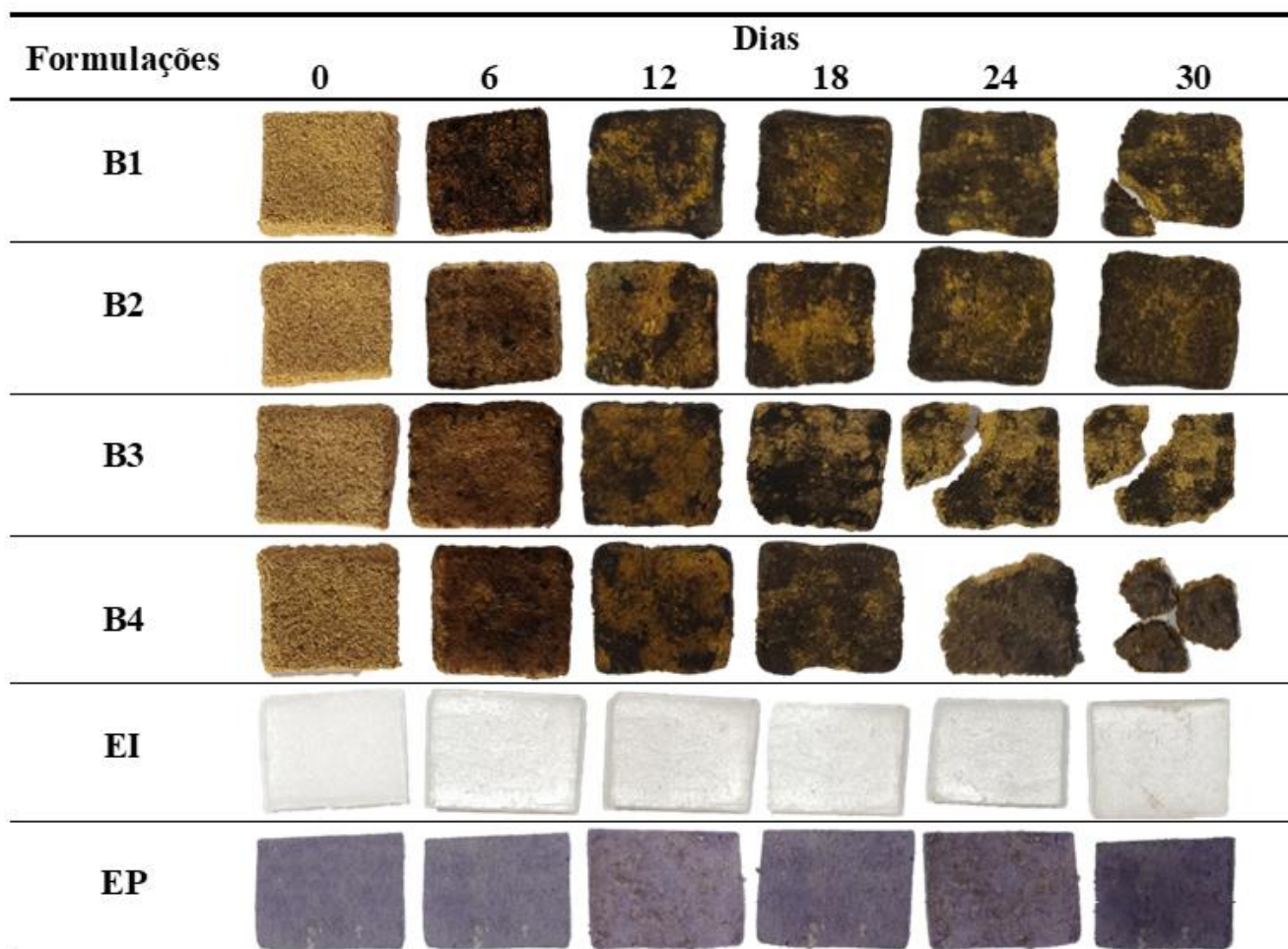
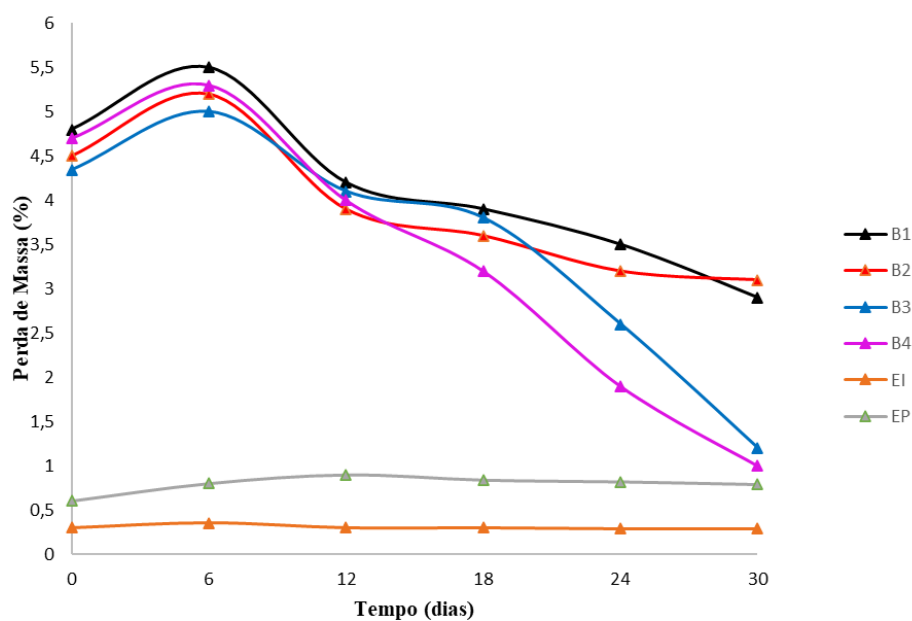


Figura 31. Análise de perda de massa dos recipientes produzidos.



De modo geral observa-se diferença nos tamanhos dos corpos de prova colocados em contato com o solo para a biodecomposição (Figura 30), comprovando que as bandejas biodegradáveis produzidas podem ser consumidas pela microbiota presente no solo, sendo transformados em compostos simples, tais como, minerais, gás carbônico, oxigênio, água, entre outros, ou seja, um composto extremamente rico em nutrientes, que pode ser utilizado como fertilizante natural para produção de novas matérias primas. Ferreira et al. (2020) ao analisar bandejas produzidas com resíduos agroindustriais relatou resultados semelhantes a este trabalho, evidenciando a diminuição dos corpos de prova e comprovando o potencial de biodegradabilidade do material.

Neste contexto o solo é um cenário típico de descarte para polímeros biodegradáveis e não biodegradáveis, por apresentar habitat diversificado para microrganismos, deste modo a biodegradação geralmente ocorre na faixa mesofílica de temperatura. Nos últimos anos, os polímeros biodegradáveis de base biológica ganharam impulso no mercado, uma vez que um dos aspectos fundamentais para o seu desenvolvimento está na possibilidade de evitar o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente e, principalmente, nos oceanos.

Dentre as formulações analisadas observa-se na Figura 31 que as bandejas resultantes das formulações B3 e B4 foram as que mais perderam massa e se degradaram em função do tempo. Conforme mencionado em Endres (2020) “a degradabilidade é uma propriedade funcional ou uma opção de descarte no final do ciclo de vida do material”, no entanto o processo de degradação depende de uma combinação de processos e parâmetros abióticos (UV, temperatura, umidade, pH e bióticos (atividade microbiana)

Outro fator que pode influenciar na degradação de bioplímeros é cristalinidade que pode aumentar a rigidez e a densidade de um polímero. Uma alta fração cristalina diminui as taxas de degradação abiótica e biótica, uma característica da região cristalina é sua baixa transferência de massa para gases e vapores, diminuindo a taxa de degradação hidrolítica. No entanto, a região amorfa é mais suscetível à hidrólise química devido à facilidade de difusão da água, as enzimas extracelulares atacam principalmente a região amorfa da estrutura do polímero (JAYA et al., 2022). Os polímeros biodegradáveis são, em geral, polímeros semicristalinos com região cristalina e amorfa.

Para fins comparativos verifica-se que as embalagens comerciais em especial a de isopor não sofreu alteração em sua estrutura. Embora a produção de bioplásticos seja significativamente inferior à dos plásticos convencionais, um material bioplástico representa, na maioria dos casos, um substituto adequado para os plásticos convencionais. Portanto,

observa-se que os bioplásticos começaram a entrar lentamente no mercado em diversos setores da indústria.

6.3 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o comportamento das amostras, em termos de padrões de difração, grupos funcionais e absorção na faixa do UV-Vis foram similares, não evidenciando grande influência da incorporação do teor de glicerina nas amostras.

No entanto, em termos de propriedades mecânicas observou-se que aumento dos valores obtidos de tensão e alongamento foi devido ao aumento da concentração de glicerina, demonstrando que o uso de plastificante pode reduzir a fragilidade estrutural das embalagens biodegradáveis produzidas.

Todas as bandejas avaliadas, quando submetidas aos testes de ângulo de contato e capacidade de absorção apresentaram afinidade por água, indicando que seu uso deve ser direcionado para produtos secos, comprovando que como embalagens de ovos o produto desenvolvido é eficiente.

Em relação as formulações produzidas, verificou-se que adição de 40 ml de glicerina foi a melhor concentração dentre as avaliadas que resultou em bandejas com boa expansão, menos imperfeições e com alta taxa de degradação.

Diante dos resultados, conclui-se que a farinha de fibra das vagens de algaroba foi eficiente para a produção de bandejas biodegradáveis e ressalta-se que esse resíduo têm uma flexibilidade notória para ser aplicado em diferentes tipos de embalagens.

6.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A seguir estão apresentados a patente desenvolvida e os artigos publicados (primeira página) para conhecimento da banca avaliadora.



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2023 001506 9

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): RECIPIENTES BIODEGRADÁVEIS ELABORADOS A PARTIR DAS VAGENS DE ALGAROBA PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PLANTAS

Resumo: O processo produtivo de plantas geralmente é realizado a partir da produção de mudas em recipientes ou sacos plásticos, oriundo do petróleo, fato considerado preocupante em virtude dos problemas causados pelo descarte inadequado e impactos ambientais consideráveis. Como alternativa, os recipientes biodegradáveis propostos apresentam vantagens ambientais e econômicas frente aos convencionalmente utilizados, e mostram-se inovadores e replicáveis para produção em larga escala, com elevado potencial de mercado, uma vez que o uso de mudas na implantação de culturas agrícolas melhora a qualidade da plantação. A utilização de materiais lignocelulosicos vem recebendo destaque neste segmento devido a presença de compostos como celulose, hemicelulose e lignina capazes de formar uma rede complexa e resistente com potencial para utilização em embalagens. Esta invenção constitui-se da utilização de farinha de vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*) para produção de recipientes biodegradáveis destinados a mudas de plantas, em que, a obtenção da farinha ocorreu através do processamento das vagens em moinho de facas, que posteriormente foram misturadas a uma solução adesiva de farinha de trigo, juntamente com o plastificante glicerol e o fertilizante NPK. Para formação do recipiente a mistura obtida foi moldada em moldes plásticos de formato cilíndrico e seca em estufa com circulação de ar por 48 horas a 50°C.

Figura a publicar: 1



DOI: 10.53660/CLM-3470-24174

Biodegradable containers made from mesquite pods *Prosopis juliflora* (Sw.) DC for the production of plant seedlings

Recipientes biodegradáveis produzidos de vagens de algaroba *Prosopis juliflora* (Sw.) DC para produção de mudas de plantas

Received: 05-04-2024 | Accepted: 08-05-2024 | Published: 16-05-2024

Jéssica Felipe do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5464-8214>
Federal University of Paraíba, Brazil
E-mail: nascimento.jessica@cear.ufpb.br

Kerolayne Santos Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0277-4539>
Federal University of Paraíba, Brazil
E-mail: kerolprof@gmail.com

Kelly Cristiane Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-8740>
Federal University of Paraíba, Brazil
E-mail: gomes@cear.ufpb.br

ABSTRACT

Currently there is a tireless search for sustainable solutions to minimize plastic waste in the environment. In this sense, this work aimed to develop a biodegradable packaging from mesquite pods (*Prosopis juliflora*), to act as a potential replacement for commercial packaging in the agro-industrial sector. To this end, mesquite pod flour (FV) was obtained to produce containers for plant seedlings. During processing, the flour was mixed with an adhesive solution of wheat starch, glycerol and NPK, molded manually and dried in an oven. The containers were evaluated by X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis), Mechanical Resistance, Contact Angle (AC) and Water Absorption. The packages obtained semi-crystalline behavior, due to the presence of lignocellulosic compounds and the addition of NPK did not influence the chemical interactions between the adhesive solution and the FV. With the increase in the concentration of FV in the containers, the ultraviolet light absorption properties were intensified, but resulted in packages with lower tensile strength and greater water absorption.

Keywords: Sustainability, Composites, Fiber.

**Title: CHARACTERIZATION OF FIBERS AND PODS OF *Prosopis juliflora* (Sw) DC FOR
BIOCOMPOSITE PRODUCTION**

Jéssica Felipe do Nascimento¹

¹ Federal University of Paraíba, Department of Mechanical Engineering, João Pessoa, Brazil

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5464-8214>

¹nascimento.jessica@cear.ufpb.br, +55(83)999361451

Kerolayne Santos Leite²

²Federal University of Paraíba, Department of Mechanical Engineering, João Pessoa, Brazil

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0277-4539>

²kerol.prof@gmail.com, +55(83)998869213

José Honório Pereira Loppes Neto³

³ Federal University of Paraíba, Department of Food Engineering, João Pessoa, Brazil

³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0002-8324>

³netoeu22@gmail.com, +55(83)988895846

Kelly Cristiane Gomes da Silva⁴

⁴ Federal University of Paraíba, Department of Renewable Energy Engineering, João Pessoa, Brazil

⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-8740>

⁴gomes@cear.ufpb.br, +55(83)32167268

Abstract

In the industry, synthetic polymers are widely used in the production of composites, because they present low cost, easy to obtain and high mechanical strength. However, the composites resulting from this type of material take hundreds of years to decompose what constitutes a major environmental concern. In this sense, biodegradable materials are an alternative to synthetic polymers because they are easily degraded and minimize environmental impacts. Among biodegradable materials, *Prosopis juliflora* (Sw) DC has received special attention for being an abundant and fiber-rich plant source. In this context, the objective of this study was to characterize fibers and pods of *Prosopis juliflora* (Sw) DC to be used as reinforcement material in biocomposites. At first, the pods were screened, eliminating those that presented

5. INTERNATIONAL FOOD, AGRICULTURE AND VETERINARY SCIENCES CONGRESS
17 - 19 February 2023, Türkiye
Kafkas University, Kars

mechanical or microbiological injuries. Then, the pods were fragmented and put in contact with water at a ratio of 1:2 (m/v) for 24 hours. To facilitate the manual separation of the fibers, the pods were crushed in an industrial blender, and this procedure the solid fraction was placed to dry at $30^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ for approximately 48 hours. After drying, the material was divided into two parts the first composed of fiber, capsule and seeds and the second only by fibers, which were crushed in a knife mill and resulted in pod flour (FP) and fiber flour (FB) respectively. The flours produced were characterized by yield analysis, granulometria, X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR) and Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis). According to the results obtained, with the processing of the pod it was possible to obtain different yields of 85.15% for PF and 47.65% for FB, but presented similar granulometry with distribution profiles classified as polydispersed and semicrystalline behavior, due to the presence of lignocellulosic compounds. The FTIR and UV-VIS data show that the chemical interactions of the flours are similar, with a wide spectral absorption range between 200 and 700 nm with a maximum ultraviolet absorption around 305 nm. Through the results obtained, it is observed that the flours (FP and FB) analyzed in this study are easy to obtain and present promising characteristics with potential to be used as reinforcement material in the development of new biocomposites.

Keywords: Polymer, composite, biodegradable, sustainability, plant fiber.

REFERÊNCIAS

- AJWANI-RAMCHANDANI, R. *et al.* Towards a circular economy for packaging waste by using new technologies: The case of large multinationals in emerging economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, 2021.
- ABDULLAH, Z. W. *et al.* Water and gas barrier properties of polyvinyl alcohol (PVA)/starch (ST)/ glycerol (GL)/halloysite nanotube (HNT) bionanocomposite films: Experimental characterisation and modelling approach. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 107-133, 2019.
- AGARWAL, S. *et al.* Major factors affecting the characteristics of starch based biopolymer films. **European Polymer Journal**, v. 160, p. 110-138, 2021.
- ALHARBI, M. A. H. *et al.* Effects of chemical composition, mild alkaline pretreatment and particle size on mechanical, thermal, and structural properties of binderless lignocellulosic biopolymers prepared by hot-pressing raw microfibrillated Phoenix dactylifera and Cocos nucifera fibers and leaves. **Polymer Testing**, v. 84, p. 106384, 2020.
- AMORIM, L.; DE MELO, S. L. S.; DE PAIVA JÚNIOR, S. L. M.; DE DEUS, E. P. Characterization of sisal fibers by infrared, UV-Vis Diffuse Reflectance and Scanning Electron Microscopy, **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 31, p. 111-125, 2018. 2019
- APRIYANTO, Ardha; COMPART, Julia; FETTKE, Joerg. A review of starch, a unique biopolymer–Structure, metabolism and in planta modifications. **Plant Science**, v. 318, 2022.
- ASSIS, R. Q. *et al.* Biodegradable packaging of cellulose acetate incorporated with norbixin, lycopene or zeaxanthin. **Industrial Crops and Products**, v. 147, p. 112-212, 2020.
- Associação Brasileira de Embalagem (ABRE). Estudo abre macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo. **Abre**, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2023-2/>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- ASYRAF, M. R. M. *et al.* Potential application of green composites for cross arm component in transmission tower: A brief review. **International Journal of Polymer Science**, v. 2020, 2020.
- BANGAR, S. P. *et al.* Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. **Carbohydrate polymers**, v. 287, 2022.
- BANGAR, Sneha, *et al.* Plant-based natural fibers for food packaging: A green approach to the reinforcement of biopolymers. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 31, p. 5029-5049, 2023.
- BARBUT, S. HARPER, B. A. Dried Ca-alginate films: Effects of glycerol, relative humidity, soy fibers, and carrageenan. **LWT**, v. 103, p. 260-265, 2019.
- BARTOS, András *et al.* Alkali treatment of lignocellulosic fibers extracted from sugarcane bagasse: Composition, structure, properties. **Polymer Testing**, v. 88, p. 106-119, 2020.

BHARDWAJ, Aastha, *et al.* Lignocellulosic agricultural biomass as a biodegradable and eco-friendly alternative for polymer-based food packaging. **Journal of Packaging Technology and Research**, v. 4, p. 205-216, 2020.

BHARGAVA, NITYA *et al.* Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. **Trends in Food Science & Technology**, 2020.

BIGNE, F.; PUPPO, M. C.; FERRERO, C. Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a “panettone-like” bread. Applicability of part-baking technology. **LWT**, v. 89, p. 666-673, 2018.

BRITO, M. K. T. *et al.* Moisture absorption in polymer composites reinforced with vegetable fiber: a three-dimensional investigation via Langmuir Model. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1847, 2019.

CABANILLAS, A.; NUNEZ, J.; SICHE, R.; Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. **Polymers and Polymer Composites**, v. 27, n. 8, p. 496-506, 2019.

CABANILLAS, Arnold *et al.* Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. **Polymers and Polymer Composites**, v. 27, n. 8, p. 496-506, 2019.

CAZÓN, P.; VELAZQUEZ, G.; VÁZQUEZ, M. Novel composite films from regenerated cellulose-glycerol-polyvinyl alcohol: Mechanical and barrier properties. **Food Hydrocolloids**, v. 89, p. 481-491, 2019.

CHACÓN, J. M. *et al.* Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. **Composites science and technology**, v. 181, p. 107688, 2019.

CHAKRABORTY, Ishita, *et al.* An insight into microscopy and analytical techniques for morphological, structural, chemical, and thermal characterization of cellulose. **Microscopy Research and Technique**, v. 85, p. 1990-2015, 2022.

CHANTAWEE, K.; RIYAJAN, S. Effect of Glycerol on the Physical Properties of Carboxylated Styrene-Butadiene Rubber/Cassava Starch Blend Films. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, p. 50-60, 2019.

CHEN, Chun-Chi *et al.* Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers. **Nature Reviews Chemistry**, v. 4, n. 3, p. 114-126, 2020.

CHI, K; WANG, H.; CATCHMARK, J. M. Sustainable starch-based barrier coatings for packaging applications. **Food Hydrocolloids**, v. 103, p. 105696, 2020.

CHIENG, B. W. *et al.* Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from oil palm mesocarp fiber. **Polymers**, v. 9, n. 8, p. 355, 2017.

CICHOSZ, Stefan; MASEK, Anna. IR study on cellulose with the varied moisture contents: Insight into the supramolecular structure. **Materials**, v. 13, 2020.

COLLAZO-BIGLIARDI, S.; ORTEGA-TORO, R.; CHIRALT, A. Using lignocellulosic fractions of coffee husk to improve properties of compatibilised starch-PLA blend films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 22, p. 100423, 2019.

COLTELLI, Maria-Beatrice, *et al.* Flexible food packaging using polymers from biomass. In: MORGANTI, Pierfrancesco. (org.). **Bionanotechnology to Save the Environment: Plant and Fishery's Biomass as Alternative to Petrol**, Basel: MDPI Books, 2019, cap. 15, p. 272-296. ISBN 978-3038426929.

CRUZ-TIRADO, J. P. *et al.* Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. **Procedia Engineering**, v. 200, p. 178 185, 2017.

CRUZ-TIRADO, Jam Pier *et al.* The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 5, p. 227-237, 2019.

DAHLBO, H. *et al.* Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland. **Waste management**, v. 71, p. 52-61, 2018.

DAMASCENO, G. A. B.; FERRARI, M.; GIORDANI, R. B. *Prosopis juliflora* (SW) DC, an invasive specie at the Brazilian Caatinga: phytochemical, pharmacological, toxicological and technological overview. **Phytochemistry reviews**, v. 16, n. 2, p. 309-331, 2017.

DE OLIVEIRA, A. C. S.; BORGES, S. V. Poli (ácido láctico) aplicado para embalagens de alimentos: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n. 1, 2020.

DEBIAGI, F.; MARIM, M. B.; MALI, S. Properties of Cassava Bagasse and Polyvinyl Alcohol Biodegradable Foams. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 23, p. 269- 276, 2014.

DÍAZ-BATALLA, L.; HERNÁNDEZ-URIBE, J. P.; ROMÁN-GUTIÉRREZ, A. D.; CARIÑO-CORTÊS, R.; CASTRO-ROSAS, J.; TÉLLEZ-JURADO, A.; GÓMEZ-ALDAPA, A. Chemical and nutritional characterization of raw and thermal-treated flours of Mesquite (*Prosopis laevigata*) pods and their residual brans, **CyTA - Journal of Food**, v. 16, n. 1, p. 444-451, 2018.

EDIYILYAM, Sreelekha, *et al.* Chitosan/gelatin/silver nanoparticles composites films for biodegradable food packaging applications. **Polymers**, v. 13, 2021.

EDRISI, S. A.; EL-KEBLAWY, A.; ABHILASH, P. C. Sustainability Analysis of *Prosopis juliflora* (Sw.) DC Based Restoration of Degraded Land in North India. **Land**. V. 9, n. 59, p. 1-18, 2020.

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate polymers**, v. 225, p. 115234, 2019.

ESPINA, M.; TIRADO, J. C.; JARA, R. S. Mechanical properties of trays based on starch of native plant species and fiber of agroindustrial wastes. **Scientia Agropecuaria**, v. 7, n. 2, p. 133-143, 2016.

- EVODE, Niyitanga, *et al.* Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, 2021.
- FAN, Y.; PICCHIONI, F. Modification of starch: A review on the application of “green” solvents and controlled functionalization. **Carbohydrate Polymers**, v. 241, p. 116350, 2020.
- FERNANDES, S. S.; ROMANI, V. P.; FILIPINI, G. S.; MARTINS, V. G. Chia seeds to develop new biodegradable polymers for food packaging: Properties and biodegradability. **Polym Eng Sci**, v. 10, p. 1–10, 2020.
- FERREIRA, D. C.M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107-120, 2020.
- FIROUZ, M. S. F.; MOHI, K. OMID, M. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. **Food Research International**, v. 141, p. 110-123, 2021.
- FITCH-VARGAS, Perla Rosa, *et al.* Effect of compounding and plastic processing methods on the development of bioplastics based on acetylated starch reinforced with sugarcane bagasse cellulose fibers. **Industrial Crops and Products**, v. 192, 2023.
- FOURATI, Yesmine *et al.* One-step processing of plasticized starch/cellulose nanofibrils nanocomposites via twin-screw extrusion of starch and cellulose fibers. **Carbohydrate polymers**, v. 229, p. 115-134, 2020.
- FRECZ, W. *et al.* The Influence of Chosen Plant Fillers in PHBV Composites on the Processing Conditions, Mechanical Properties and Quality of Molded Pieces. **Journals Polymers**, v. 13 n. 22, p. 1-19, 2021.
- FUENTES, R. A. *et al.* Development of biodegradable pots from different agroindustrial wastes and byproducts. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 30, p. 03-38, 2021.
- GABIRA, M. M. *et al.* Alternative substrates and containers for *Ilex paraguariensis* seedlings. **Acta Iguazu**, v. 9, n. 4, p. 78-87, 2020.
- GANDARA, Meriane *et al.* Sugarcane bagasse fibers reinforced in polyurethane for sorption of vegetal oil. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-12, 2020.
- GANI, S. S.; KUSUMAYANTI, H. The Optimization of Addition of Glicerol on the Biodegradable Foam from Corn Husk. **Journal of Vocational Studies on Applied Research**, vol. 4, n. 1, p. 18-26, 2022.
- GOLMAKANI, M. E. *et al.* Investigation of Wood Flour Size, Aspect Ratios, and Injection Molding Temperature on Mechanical Properties of Wood Flour/Polyethylene Composites. **Materials**, v. 14, n. 12, p. 3406, 2021.
- GONG, Liang, *et al.* Sustainable utilization of fruit and vegetable waste bioresources for bioplastics production. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 44, 2024.

GROH, K. J. *et al.* Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. **Science of the total environment**, v. 651, p. 3253-3268, 2019.

GUNAWAN, N. R. *et al.* Rapid biodegradation of renewable polyurethane foams with identification of associated microorganisms and decomposition products. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, p.10-18, 2020.

GUPTA, Himanshu, *et al.* Synthesis of biodegradable films obtained from rice husk and sugarcane bagasse to be used as food packaging material. **Environmental Engineering Research**, v. 25, p. 506-514, 2020.

GUSMÃO, R. P. *et al.* Particle size, morphological, rheological, physicochemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Proposis juliflora*). **Journal of Cereal Science**, v. 69, p. 119-124, 2016.

HAASE, Diane L. *et al.* The High Cost of the Low-Cost Polybag System: A Review of Nursery Seedling Production Systems. **Land**, v. 10, n. 8, p. 826, 2021.

HASAN, M. *et al.* Micro Crystalline Bamboo Cellulose Based Seaweed Biodegradable Composite Films for Sustainable Packaging Material. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, p. 1602-1612, 2019.

HERNANDEZ, C. C.; FERREIRA, F. F.; ROSA, D. S. X-ray powder diffraction and other analyses of cellulose nanocrystals obtained from corn straw by chemical treatments. **Carbohydrate polymers**, v. 193, p. 39-44, 2018.

HUSSAIN, M. Iftikhar, *et al.* Invasive Mesquite (*Prosopis juliflora*), an allergy and health challenge. **Plants**, v. 9, 2020.

HYNESS, N. R. J. *et al.* Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from Heteropogon Contortus Plant. **Journal of Natural Fibers**, v. 15, n. 1, p. 146-153, 2018.

ILYAS, R. A. *et al.* Effect of hydrolysis time on the morphological, physical, chemical, and thermal behavior of sugar palm nanocrystalline cellulose (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr). **Textile Research Journal**, v. 91, n. 1-2, p. 152-167, 2021.

ILYAS, R. A. *et al.* Thermal, Biodegradability and Water Barrier Properties of Bio-Nanocomposites Based on Plasticised Sugar Palm Starch and Nanofibrillated Celluloses from Sugar Palm Fibres. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v. 14, n. 2, p. 234-248, 2020.

INUBUSHI, K. *et al.* Effects of biodegradable plastics on soil properties and greenhouse gas production. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 1, p. 183-188, 2022.

JAFARZADEH, S. *et al.* Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their by-products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 100, p. 262-277, 2020.

JAYA, Jaka Darma, *et al.* Physical and mechanical properties of biodegradable pot derived from oil palm empty fruit bunch and sodium alginate. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 65, 2022.

JEEVAHAN, J.; CHANDRASEKARAN, M. Nanoedible films for food packaging: A review. **Journal of Materials Science**, v. 54, n. 19, p. 12290-12318, 2019.

JUANGA-LABAYEN, J. P.; YUAN, Q. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part A: Factors Affecting Tensile Strength. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 13, p. 6964, 2021.

JUNIOR, A. F. S.; OLIVEIRA, A. L. The social and environmental benefits of sustainable packaging. **Interface Tecnológica**, v. 16, n. 2, p. 274-286, 2019.

KARDKHEILI, H. Y.; PIZZI, A. Ionic liquid- modified lignin as a bio- coupling agent for natural fiber- recycled polypropylene composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 181, p. 107-120, 2020.

KARIM, A. A. *et al.* Review on Antimicrobial Packaging from Biodegradable Polymer Composites. **Polymers**, v. 174, n. 14, p. 1-29; 2022.

KHOAELE, Katleho Keneuwe, *et al.* The devastation of waste plastic on the environment and remediation processes: a critical review. **Sustainability**, v. 15, n. 6, 2023.

KIBRIA, Md Golam, *et al.* Plastic waste: Challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management. **International Journal of Environmental Research**, v. 17, n. 20, p. 1-8, 2023.

KOCAMAN, S.; KARAMAN, M. GURSOY, M.; AHMETI, G. Chemical and plasma surface modification of lignocellulose coconut waste for the preparation of advanced biobased composite materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 159, p. 48-57, 2017.

KOÈETKOV, V.; BRASAVA, S. M. EFFECT OF BIODEGRADABLE PACKAGING ON THE SHELF-LIFE OF PASTEURISED WHOLE EGG MASS. **PROCEEDINGS OF THE LATVIAN ACADEMY OF SCIENCES**, v. 76, n. 1, p. 64-68, 2022.

KOSIOR, E.; CRESCENZI, I. Solutions to the plastic waste problem on land and in the oceans. *In: LETCHER, Trevor M. (org.). Plastic waste and recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*, Massachusetts: Academic Press, 2020. cap. 16, p. 415-446. ISBN 978-0128178805.

LANDIM, A. P. M. *et al.* Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, p. 82-92, 2016.

LEHNER, R. *et al.* Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 4, p. 1748-1765, 2019.

LI, W. *et al.* Study on the compatible interface of bamboo fiber/polylactic acid composites by in-situ solid phase grafting. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 141, n. 1, p. 325-332, 2019.

LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. *et al.* Comparative study of the characteristics of green and brown coconut fibers for the development of green composites. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 1637-1660, 2018.

- LOPES, A. C. Application and characterisation of industrial brewing by-products in biodegradable starch-based expanded composites. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 57, n. 8, p. 5523-5531, 2022.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. **International journal of biological macromolecules**, v. 147, p. 1343-1353, 2020.
- MAHMUD, Md Arif; BELAL, Shah Alimuzzaman; GAFUR, Md Abdul. Development of a biocomposite material using sugarcane bagasse and modified starch for packaging purposes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 1856-1874, 2023.
- MARICHELVAM, M. K.; JAWAID, M.; ASIM, M. Corn and rice starch-based bio-plastics as alternative packaging materials. **Fibers**, v. 7, n. 4, p. 32, 2019.
- MARINO, S. *et al*, Development of active films utilizing antioxidant compounds obtained from tomato and lemon by-products for use in food packaging. **Food Control**, v. 140, p. 109-128, 2022.
- MEDEIROS E. S. *et al*. Uso de Polímeros Condutores em Sensores. Parte 1: Introdução aos Polímeros Condutores. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.7, n. 2, p. 62 – 77, 2018.
- MEHERISHI, L.; NARAYANA, S. A.; RANJANI, K. S. Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review. **Journal of cleaner production**, v. 237, p. 117-126, 2019.
- MEIRELES, B. J H. *et al*. Ecological trays based on banana (*Musa paradisiaca*) and achira (*Canna indica*) leaf blades. **Physical, mechanical and chemical characteristics**, v. 11, n. 1, p. 87-96, 2021.
- MEYS, R.; FRICK, F.; WESTHUES, S. STERNBERG, ANDRÉ.; KLANKERMAYER, J. BARDOW, A. Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling. Resources, **Conservation and Recycling**, v. 162, p. 1-10, 2020.
- MLALILA, N.; HILONGA, A.; SWAI, H.; DEVLIEGHERE, F.; RAGAERT, P. Antimicrobial packaging based on starch, poly(3-hydroxybutyrate) and poly(lactic-co-glycolide) materials and application challenges. **Trends in Food Science & Technology**, v. 74, p. 1-11, 2018.
- MUDGIL, D.; BARAK, S. Mesquite gum (*Prosopis gum*): Structure, properties & applications-A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 159, p. 1094-1102, 2020.
- MUSTAPHA, S. N. H.; WAN, J. S. Effect of hybridization composition and glycerin content on novel corn starch/nata de coco plastic film: Thermal, mechanical, and degradation study. **Food Chemistry**, v 373, p. 131-145, 2022.

MWANGI, W. *et al.* Substitution of Plastics with Organic Pots in Tree Seedlings Production for Sustainable Environmental Conservation. **East African Journal of Science, Technology and Innovation**, v. 2, n. 3, 2021.

NAMPHONSANE, A., *et al.* Development of biodegradable rigid foams from pineapple field waste. **Polymers**, v. 15, 2023.

NARANCIC, T. *et al.* Recent Advances in Bioplastics: Application and Biodegradation. **Polymers**, v. 12, p. 1-38, 2020.

NIU, X. *et al.* Rosin modified cellulose nanofiber as a reinforcing and co-antimicrobial agents in polylactic acid /chitosan composite film for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 183, p. 102-109, 2018.

NURAZZI, N. M. *et al.* Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments. **Polymers**, v. 13, n. 16, p. 2710, 2021.

OMRAN, A. A. B. *et al.* Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: a review. **Polymers**, v. 13, n. 2, p. 231, 2021.

PARIDA, S. *et al.* Performance of Teak Seedlings in Different Biodegradable Containers. **Indian Forester**, v. 147, n. 7, p. 615-620, 2021.

PATIL, A. Y. *et al.* Influence of bio-degradable natural fiber embedded in polymer matrix. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 7532-7540, 2018.

PATNAIK, P.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Prosopis (*Prosopis juliflora*): blessing and bane. **Tropical Ecology**, v. 58, n. 3, p. 455-483, 2017.

PAULA, C. R. P.; TRIANOSKI, R.; AZEVEDO, E. Development and characterization of sawdust and sisal fiber reinforced vegetable based polyurethane foam hybrid composites. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-10, 2020.

PAULI, V.; ROGGO, Y.; KLEINEBUDDE, P.; KRUMME, M.; Real-time monitoring of particle size distribution in a continuous granulation and drying process by near infrared spectroscopy. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. v. 141, p. 90-99, 2019.

PEIGHAMBARDOUST, S. J. *et al.* Properties of active starch-based films incorporating a combination of Ag, ZnO and CuO nanoparticles for potential use in food packaging applications. **Food packaging and shelf Life**, v. 22, p. 100420, 2019.

PULLA, P. V. *et al.* Wettability of gelatin-based films: The effects of hydrophilic or hydrophobic plasticizers and nanoparticle loads. **Journal of Food Engineering**, v. 297, p. 110-128, 2021.

QIN, Y.; LIU, Y.; YONG, H.; LIU, J. ZHANG, X.; LIU, J.; Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from

Lycium ruthenicum Murr. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 134, p. 80-90, 2019.

RAFIDISON, B. H. Using infrared spectrum analyses to predict tensile strength of fibres in a group of closely related plant species: case of Mascarenes *Pandanus* spp. **Applied Sciences**, v. 2, n. 19, p. 1-15, 2020.

RAHARDIYAN, Dino, *et al.* Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging—A review. **Enzyme and microbial technology**, v. 168, 2023.

RAMESH, M. *et al.* Mechanical and water absorption properties of *Calotropis gigantea* plant fibers reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 3367-3372, 2021.

REICHERT, Corina L., *et al.* Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. **Polymers**, v. 12, 2020.

REIS, M. O.; OLIVATO, J. B.; Bilck, A. P.; ZANELA, J. GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Biodegradable trays of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 481-487, 2018.

SALAMA, A. *et al.* Carboxymethyl cellulose prepared from mesquite tree: New source for promising nanocomposite materials. **Carbohydrate polymers**, v. 189, p. 138-144, 2018.

SALIM, S.; RIHAYAT, T.; RISKINA, S. Enhanced mechanical properties of natural fiber bamboo/pineapple leaf/coconut husk reinforced composites for application in bio-board. **Geomate Journal**, v. 19, n. 75, p. 168-174, 2020.

SAMIR, Aya, *et al.* Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. **Npj Materials Degradation**, v. 6, n. 68, 2022.

SÁNCHEZ-GUTIÉRREZ, M. *et al.* Cellulose Nanofibers from Olive Tree Pruning as Food Packaging Additive of a Biodegradable Film. **Foods**, v. 10, n°. 7, p. 15-25, 2021.

SANI, Mahmood Alizadeh *et al.* Carbohydrate-based films containing pH-sensitive red barberry anthocyanins: Application as biodegradable smart food packaging materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 255, p. 117488, 2021.

SANJAY, M. R. A. *et al.* comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. **Carbohydrate Polymers**, v. 207, p. 108-121, 2019.

SANTOS, T. A. *et al.* Properties of chitosan–papain biopolymers reinforced with cellulose nanofibers, **Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 9, p. 1-11, 2021.

SANYANG, M. L. *et al.* Sugar palm starch-based composites for packaging applications. **Bionanocomposites for packaging applications**, p. 125-147, 2018.

SARSAIYA, Surendra *et al.* Microbial dynamics for lignocellulosic waste bioconversion and its importance with modern circular economy, challenges and future perspectives. **Bioresource technology**, v. 291, p. 121905, 2019.

SCHELIGA, M. *et al.* Yield and quality of bast fibre from *Abutilon theophrasti* (Medic.) in southwest Germany depending on the site and fibre extraction method. **Industrial Crops and Products**, v. 121, p. 320-327, 2018.

SEKI, Y. *et al.* A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers. **Cellulose**, v. 29, p. 4877-4918, 2022.

SHAIKH, S.; YAGOOB, M.; AGGARWAL, P. An overview of biodegradable packaging in food industry. **Current Research in Food Science**, v. 4, p. 503-520, 2021.

SHEN, Maocai, *et al.* Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution?. **Environmental pollution**, v. 263, 2020.

SIDORCZUK, Dominik, *et al.* Structural and optical properties of struvite. Elucidating structure of infrared spectrum in high frequency range. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 124, p. 8668-8678, 2020.

SILVA, A. L. P. *et al.* Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, p. 126683, 2021.

SILVA-GUZMÁN, J. A. *et al.* Properties of thermoplastic corn starch based green composites reinforced with Barley (*Hordeum vulgare* L.) straw particles obtained by thermal compression. **Fibers and Polymers**, v. 19, n. 9, p. 1970-1979, 2018.

SINGH, Suraj Kumar, *et al.* Fabrication and evaluation of mechanical properties of polymer matrix composite using nano fibers as a reinforcement. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1376-1383, 2021.

SPADA, J. TESSARO, A. J. E. C. Biodegradable Cassava Starch Based Foams Using Rice Husk Waste as Macro Filler. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 4315-4325, 2019.

SUCINDA, E. F. *et al.* Development and characterisation of packaging film from Napier cellulose nanowhisker reinforced polylactic acid (PLA) bionanocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 14, p. 1-15, 2021.

SURENDREN, A. *et al.* A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. **Green Chemistry**, v. 24, p. 8606-8636, 2022.

TABASUM, S. A review on blending of corn starch with natural and synthetic polymers, and inorganic nanoparticles with mathematical modeling. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 122, p. 969-996, 2019.

TAN, Shiou Xuan, *et al.* A comprehensive review on the emerging roles of nanofillers and plasticizers towards sustainable starch-based bioplastic fabrication. **Polymers**, v. 14, n. 4, 2022.

TANWAR, Rohit, *et al.* Development and characterization of PVA-starch incorporated with coconut shell extract and sepiolite clay as an antioxidant film for active food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 185, p. 451-461, 2021.

THANGADURAI, D. *et al.* Greener composites from plant fibers: Preparation, structure, and properties. In: KHARISSOVA, Oxana Vasilievna; MARTÍNEZ, Leticia Myriam Torres; KHARISOV, Boris Ildusovich. (org.). **Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications**, Berlín: Springer, 2020, p. 1-9. ISBN 978-3030362690.

TIAN, M; GAO, J; LIANG, H. Preparation and performance of biomass seedling containers made with straw and cow manure. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 9968-9980, 2019.

TIBALIA, E. M. S. E.; WINTOKO, J.; PURNOMO, C. W. Biodegradable Food Container from Rice Straw and Sugarcane Bagasse with Orange Peel Addition. **Earth and Environmental Science**, V. 12, p. 1-7, 2023.

TORRES, S. S. *et al.* Drying technology of mesquite pods (*Prosopis laevigata*) and microstructural insights. **British Food Journal**, 2020.

TREINYTE, J. *et al.* Forestry wastes filled polymer composites for agricultural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, n. 20, p. 388-406, 2018.

VAN-SHOVEN, Y. *et al.* An innovative route to circular rigid plastics. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6284, 2019.

VELUSAMY, K. *et al.* The influence of fiber content and length on mechanical and water absorption properties of Calotropis Gigantea fiber reinforced epoxy composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 48, n. 8, p. 1274-1290, 2019.

WANG, Qian, *et al.* A novel functionalized food packaging film with microwave-modified konjac glucomannan/chitosan/citric acid incorporated with antioxidant of bamboo leaves. **LWT**, v. 166, 2022.

WHANG, I. *et al.* Biobased materials for food packaging. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2022.

WILSON, M. D. *et al.* Innovative processes and technologies for modified atmosphere packaging of fresh and fresh-cut fruits and vegetables. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 59, n. 3, p. 411-422, 2019.

WORKU, L. A. *et al.* Experimental investigations on PVA/chitosan and PVA/chitin films for active food packaging using *Oxytenanthera abyssinica* lignin nanoparticles and its UV-shielding, antimicrobial, and antiradical effects. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 254, n. 1, p. 135-148, 2024.

XIE, J; HUNG, Y. UV-A activated TiO₂ embedded biodegradable polymer film for antimicrobial food packaging application. **Lwt**, v. 96, p. 307-314, 2018.

XU, M. *et al.* The effect of repeated versus continuous annealing on structural, physicochemical, and digestive properties of potato starch. **Food Research International**, v. 111, p. 324-333, 2018.

YAMAGUCHI, Yusuke, *et al.* Evaluation and suppression of retrogradation of gelatinized rice starch. **Journal of nutritional science and vitaminology**, v. 65, 2019.

YU, Z. *et al.* Silica in situ enhanced PVA/chitosan biodegradable films for food packages. **Carbohydrate polymers**, v. 184, p. 214-220, 2018.

ZHANG, X.; WANG, C.; CHEN, Y. Properties of selected biodegradable seedling plug-trays. **Scientia Horticulturae**, v. 249, p. 177-184, 2019.